

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université d' Ain-Temouchent Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et Technologie  
Département d'Electronique et de Télécommunications  
Laboratoire des structures intelligentes (SSL).



## THÈSE

*Pour l'obtention du titre de Docteur en Télécommunications*  
*Domaine : Science et Technologie*  
*Filière : Télécommunications*  
*Spécialité : Télécommunications optiques et micro-ondes*

**Thème :**

# Conception de Capteur à Base des Fibres Optiques.

Présentée et soutenue publiquement le 16/10/2024 par :

***MIREN ILHEM***

Devant le jury composé de :

FEROUANI Souheyla	MCA	Président	U.B.B Ain-Temouchent
DEBBAL Mohammed	MCA	Directeur de thèse	U.B.B Ain-Temouchent
CHIKH-BLED Hicham	MCA	Co- Directeur de thèse	U.A.B.B Tlemcen
BENCHERIF Kaddour	Pr	Examineur	U.B.B Ain-Temouchent
KARIM Fethallah	Pr	Examineur	U.A.B.B Tlemcen
BABA AHMED Mohammed Zakarya	MCA	Examineur	U.A.B.B Tlemcen
OUADAH Mohamed Chems Eddine	MCA	Invité	U.M.M Tizi Ouzou

***Année universitaire 2023 - 2024***

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Dédicace

Je souhaite dédier ce travail à mes parents pour leurs soutiens indéfectibles et leurs encouragements tout au long de ma scolarité. Que dieu les gardes et les protège.

Également, je dédie ce travail à mes sœurs : Fouzia et Hanane, et mon frère Omar, pour leurs patiences et leurs soutiens que m'ont permis de surmonter les difficultés rencontrées pendant cette thèse. En particulier, je souhaite dédier ce travail à mon fils Mouad, mon neveu : Adam, et ma nièce : Nihel.

A tous les membres de ma famille à laquelle j'ai l'honneur d'appartenir. Et à ceux que Dieu a voulu réunir en tant qu'amis. À tous ceux qui ont une part dans mon cœur.

Je suis également heureuse de dédier ce travail à mes professeurs et à tous ceux qui ont supervisé ma formation.

# Remerciements

Je commence par Le Nom d'Allah le Clément et le Miséricordieux Gloire à Allah Seigneur de l'univers, Salut et paix sur Le Prophète Mohammad.

J'adresse à titre personnel ma plus profonde gratitude à mon directeur de thèse Dr. DEBBAL Mohammed, que je remercie vivement pour son encadrement. Je suis reconnaissant envers lui de m'avoir accueilli au sein de son équipe et pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ma formation. Ses conseils précieux et son soutien constant ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail. Je lui exprime ici toute ma gratitude sincère.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à Dr. CHIKH-BLED Hicham, Maître de conférences à l'Université de Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, pour sa direction et son suivi attentif tout au long de ma formation en doctorat. Son enthousiasme exceptionnel, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et son efficacité ont été des facteurs essentiels qui m'ont permis de finaliser ce mémoire. Je suis ravi et honoré par la présence de Dr. FEROUANI Souheyla, qui a accepté de présider ce jury.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Pr. BENCHERIF Kaddour, Pr. KARIM Fethallah et Dr. BABA AHMED Zakarya, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger ce travail et de faire partie du jury de cette thèse.

Je tiens à remercier également Dr. OUADAH Mohamed Chems Eddine d'avoir accepté d'assister à cette thèse.

J'aimerais exprimer mes sincères remerciements à mes collègues de ma formation pour toute l'aide, leurs gratitudes leurs disponibilités et leurs collaborations qu'ils m'ont apportée pendant mon travail.

À tous ceux qui, bien que non mentionnés ici, ont joué un rôle, direct ou indirect, dans le succès de ce travail, je tiens à exprimer ma sincère gratitude.

Je ne pourrais jamais oublier ma merveilleuse famille qui m'a toujours soutenu dans toutes mes décisions. Vous êtes une source majeure de motivation pour moi, et je suis déterminé à vous rendre fier. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents pour leur soutien inconditionnel à chaque étape de ma vie. Enfin, je souhaite exprimer mes sincères remerciements à mes proches qui me sont chers. Je leur souhaite un avenir plein de réussite. À tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de cette thèse, je leur adresse ma profonde gratitude.

# Résumé

Ce travail de recherche explore le potentiel des fibres à cristaux photoniques (PCF) pour la conception de capteurs à haute sensibilité, répondant ainsi à la demande croissante de solutions de détection performantes dans divers domaines. Grâce aux caractéristiques exceptionnelles de ses fibres telles qu'une grande flexibilité de guidage de la lumière et une forte interaction entre le cœur de la fibre et l'environnement externe. La thèse se concentre sur la modélisation numérique des PCF, permettant d'identifier les paramètres géométriques clés qui influencent leurs propriétés optiques et, par conséquent, la sensibilité des capteurs.

La technique numérique utilisée pour simuler la propagation de la lumière dans est la méthode Beam Propagation Method (BPM). Cette méthode est utile pour modéliser l'évolution des champs électromagnétiques dans des dispositifs à guidage optique non homogène. Ce qui est essentiel pour concevoir des capteurs optiques sensibles et efficaces.

Les contributions de cette thèse ouvrent de nouvelles perspectives prometteuses pour le développement de capteurs à base de PCF, offrant des solutions innovantes pour des applications variées, notamment en santé, en environnement et en industrie.

L'étude propose des directions futures pour la recherche, incluant l'intégration de nanomatériaux aux structures PCF, le développement de capteurs multiparamétriques et l'optimisation des techniques de fabrication. Les résultats de la thèse mettent en lumière le potentiel des PCF pour la réalisation de capteurs à haute sensibilité et à performance optimale, contribuant ainsi à l'avancement des technologies de détection et de surveillance.

**Mot clés :** Fibres optiques, Fibres à cristaux photoniques, Sensibilité, Dispersion chromatiques, Modélisation numérique.

# Abstract

This research explores the potential of photonic crystal fibers (PCF) for the design of high-sensitivity sensors, addressing the growing demand for effective detection solutions across various fields, such as high flexibility in guiding light and strong interaction between the fiber core and the external environment. The thesis focuses on the numerical modeling of PCFs, allowing for the identification of key geometric parameters that influence their optical properties and, consequently, the sensitivity of the sensors.

The numerical technique used to simulate light propagation is the **Beam Propagation Method** (BPM). This method is useful for modeling the evolution of electromagnetic fields in non-homogeneous optical guiding devices, which is essential for designing sensitive and efficient optical sensors.

The contributions of this thesis open up new promising perspectives for the development of PCF-based sensors, offering innovative solutions for various applications, particularly in health, environmental, and industrial fields.

The study proposes future research directions, including the integration of nanomaterials into PCF structures, the development of multiparameter sensors, and the optimization of fabrication techniques. The results of the thesis highlight the potential of PCFs for creating high-sensitivity, optimally performing sensors, thus contributing to the advancement of detection and monitoring technologies.

**Keywords:** Optical fibers, Photonic crystal fibers, Sensitivity, Chromatic dispersion, Numerical modeling.

## ملخص

تستكشف هذه الدراسة البحثية إمكانات الألياف الكريستالية الفوتونية (PCF) في تصميم أجهزة استشعار عالية الحساسية، استجابةً للطلب المتزايد على حلول الكشف الفعالة في مجالات متنوعة ، مثل المرونة العالية في توجيه الضوء والتفاعل القوي بين قلب الليف والبيئة الخارجية. تركز الأطروحة على النمذجة العددية للألياف الكريستالية الفوتونية، مما يسمح بتحديد المعايير الهندسية الرئيسية التي تؤثر على خصائصها البصرية وبالتالي على حساسية أجهزة الاستشعار.

التقنية العددية المستخدمة لمحاكاة انتشار الضوء هي طريقة انتشار الحزمة (Beam Propagation Method - BPM)، وهي طريقة مفيدة لنمذجة تطور الحقول الكهرومغناطيسية في الأجهزة ذات التوجيه البصري غير المتجانس، مما يجعلها ضرورية لتصميم أجهزة استشعار ضوئية حساسة وفعالة.

تفتح مساهمات هذه الأطروحة آفاقاً جديدة واعدة لتطوير أجهزة استشعار قائمة على الألياف الكريستالية الفوتونية، مما يقدم حلولاً مبتكرة لتطبيقات متنوعة، لا سيما في مجالات الصحة والبيئة والصناعة.

تقترح الدراسة اتجاهات بحثية مستقبلية، تشمل دمج المواد النانوية في هياكل الألياف الكريستالية الفوتونية، وتطوير أجهزة استشعار متعددة المعايير، وتحسين تقنيات التصنيع. تسلط نتائج الأطروحة الضوء على إمكانات الألياف الكريستالية الفوتونية في تحقيق أجهزة استشعار عالية الحساسية والأداء المثالي، مما يسهم في تقدم تقنيات الكشف والمراقبة.

**الكلمات المفتاحية:** الألياف البصرية، الألياف الكريستالية الفوتونية، الحساسية، التشتت اللوني، النمذجة العددية.

# Liste des matières

Dédicace.....	I
Remerciements .....	II
Résumé .....	IV
Abstract.....	V
ملخص .....	VI
Liste des matières .....	VII
Liste des Abréviations .....	X
Liste des Figures .....	XII
Liste des Tableaux.....	XV
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les fibres optiques .....	8
I.1. Introduction.....	9
I.2. La fibre optique conventionnelles .....	10
I.2.1. Qu'est-ce qu'une fibre optique ?.....	10
I.2.1.1 Composition générale .....	10
I.2.1.2 Principe de guidage et processus de réflexion totale interne RTI .....	11
I.2.1.3 Mode de propagation d'une fibre conventionnelle.....	13
I.2.1.4 Les différentes catégories de fibres optiques silices .....	16
a. Fibres optiques monomodales : .....	17
b. Fibres optiques multimodales : .....	17
I.2.2. Applications aux télécommunications .....	19
I.3. Les fibres microstructurées.....	19
I.3.1. Qu'est qu'une fibre optique microstructurée ?.....	19
I.3.2. Notion sur les fibres optiques microstructurées .....	22
I.3.3. Caractéristiques optiques des Fibres optiques microstructurées.....	29
I.3.4. Avantage des fibres optiques microstructurées .....	37
I.3.5. Applications des fibres optiques à base des cristaux photoniques .....	37
I.4. Conclusion : .....	40
Chapitre 2 : Généralité sur les capteurs.....	52
II.1. Introduction.....	53
II.2. Capteurs classiques.....	54
II.2.1. Définition.....	54
II.2.2. Principales caractéristiques des capteurs .....	54

## Liste des matières

---

II.2.1.1	Etendue de la mesure ou dynamique .....	55
II.2.1.2	Résolution.....	55
II.2.1.3	Fonction de transfert .....	55
II.2.1.4	Fiabilité.....	55
II.2.1.5	Sélectivité .....	55
II.2.1.6	Etalonnage.....	55
II.2.1.7	Linéarité .....	56
II.2.1.8	Caractéristiques statistiques .....	57
II.2.1.9	Rapidité .....	58
II.2.1.10	Sensibilité .....	58
II.2.1.11	Limite de détection .....	59
II.2.3.	Types des capteurs .....	59
II.2.3.1.	Capteurs actifs .....	59
II.2.3.2.	Capteurs passifs .....	60
II.2.3.3.	Capteur composite :.....	60
II.2.4.	Grandeurs d'influence .....	61
<b>II.3.</b>	<b>Capteurs optiques.....</b>	<b>61</b>
<b>II.4.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>84</b>
<b>Chapitre 3 : Résultats et discussion .....</b>		<b>97</b>
<b>III.1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>98</b>
<b>III.2.</b>	<b>Méthodes de modélisation des PCFs .....</b>	<b>99</b>
III.2.1.	Méthode des éléments finis FEM.....	100
III.2.2.	Méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD .....	102
III.2.3.	Méthode de propagation des faisceaux BPM .....	104
<b>III.3.</b>	<b>Conception d'un capteur de pression .....</b>	<b>105</b>
I.2.1.1	Description de la structure de la PCF .....	106
III.3.1.	Résultats et interprétations .....	109
<b>III.4.</b>	<b>Conception d'un capteur de salinité .....</b>	<b>113</b>
I.4.1.	Description de la structure de la PCF .....	114
I.4.2.	Résultats et interprétations.....	116
III.4.2.1.	Premier anneau infiltré de l'eau de mer : .....	117
III.4.2.2.	L'impact des paramètres opto-géométriques sur les performances de détection 120	
III.4.2.3.	Les multiples fonctionnalités de la fibre à cristaux photoniques .....	122
<b>III.5.</b>	<b>Conception d'un capteur de glucose.....</b>	<b>125</b>
III.5.1.	Description de la structure de la PCF .....	127

## Liste des matières

---

III.5.2. Résultats et interprétations .....	128
<b>III.6. Conception d'un capteur de Malaria .....</b>	<b>134</b>
<b>III.7. Conception d'un capteur chimique.....</b>	<b>141</b>
<b>III.8. Conclusion .....</b>	<b>146</b>
<b>Conclusion générale et perspectives .....</b>	<b>153</b>
<b>Liste des travaux .....</b>	<b>155</b>

# Liste des Abréviations

BIP	Bandes Interdites Photoniques
BPM	Méthode des Faisceaux Propagés
CE	Electrophorèse Capillaire
C-APML	Circular Anisotropic Perfectly Matched Layer
EDP	Equations aux Dérivées Partielles
EMI	Interférences Electromagnétiques
EMA	Effective-Medium Approximation
EMW	Ondes Radio Electromagnétiques
FDTD	Méthode des Différents Finies Temporelle
FEM (MEF)	Méthode des Eléments Finis
FE-BPM	BPM basée sur La Méthode des Eléments Finis
FMAS	Fibre Microstructurée Air-Silice
FOM	Fibres Optiques Microstructurées
FSI	Fibre à Saut d'Indice
FSM	Fundamental Space-Filling Mode
FPG	Fiber Bragg Grating
HE	Helical Mode
HGB	Hemoglobin
LD	Limite De Détection
LED	Light-Emitting Diode
LPFBG	Long-Period Fiber Bragg Gratings
OCT	Optical Coherence Tomography
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry
ON	Ouverture Numérique
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
PCF	Photonic Crystal Fiber
PMF	Polarization-Maintaining <i>Fiber</i>
PMMA	Polymethyl Methacrylate
PSU	Practical Salinity Unit
RBC	Red Blood Cell
RFI	Interférences Radioélectriques

## Liste des Abréviations

---

RI	Refractive Index
RTI	Réflexion Totale Interne
RTIM	Réflexion Totale Interne Modifiée
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SCG	Supercontinuum Generation
SMF	Single Mode Fiber
SPFBG	Short-Period Fiber Bragg Gratings
SPR	Résonance des Plasmons de Surface
TE	Transverses Electriques
TM	Transverses Magnetiques
WDM	Wavelength Division Multiplexing
ZDW	Zero Dispersion Wavelength

# Liste des Figures

## Chapitre 1 : Généralités sur les fibres optiques

<b>Figure I.1</b> Structure d'un guide optique [4] .....	10
<b>Figure I.2.</b> Guidage de la lumière dans un guide optique [7] .....	11
<b>Figure I.3.</b> Guidage de la lumière dans le milieu d'indice $n_1$ dans une fibre conventionnelle par réflexion totale interne RTI. ....	12
<b>Figure I.4.</b> Représentation du profil d'intensité des trois modes LP [12]. ....	14
<b>Figure I.5.</b> Les deux familles de fibres optiques [18]. ....	16
<b>Figure I.6.</b> Fibre monomode .....	17
<b>Figure I.7.</b> Fibre multimode à saut d'indice .....	18
<b>Figure I.8.</b> Fibre multimode à gradient d'indice .....	18
<b>Figure I.9.</b> Une multitude de fibres optiques microstructurées [79] .....	21
<b>Figure I.10.</b> Représentation géométrique d'une fibre microstructurée .....	22
<b>Figure I.11.</b> Un exemple de sections transverses des deux familles de fibres microstructurées [82]. ....	23
<b>Figure I.12.</b> Principe de guidage dans les fibres photoniques à BIP [79]. ....	25
<b>Figure I.13.</b> Principe de guidage dans les fibres photoniques à RTI [79]. ....	26
<b>Figure I.14.</b> Première étape de la méthode de fabrication "stack and draw" [88]. ....	27
<b>Figure I.15.</b> Présentation schématique des différentes étapes de fabrication des fibres microstructurées [89]. ....	28
<b>Figure I.16</b> Comportement modal des fibres microstructurées en fonction de la longueur d'onde normalisée $a/\lambda$ pour des différents rapports de remplissage $d/\Lambda$ . ....	30
<b>Figure I.17</b> Variation de l'indice effectif de la silice en fonction de la longueur d'onde .....	31
<b>Figure I.18</b> Variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour une fibre microstructurée avec $\Lambda = 2\mu\text{m}$ pour : $d = 0.5\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$ . ....	33
<b>Figure I.19</b> Courbe d'atténuation d'une fibre microstructurée en verre de composition AsSe [100]. ....	34
<b>Figure I.20</b> Variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde. ....	35

## Chapitre 2 : Généralité sur les capteurs

<b>Figure II. 1</b> Définition d'un capteur classique [1]. ....	54
<b>Figure II. 2</b> l'étalonnage dans un capteur [3]. ....	56
<b>Figure II. 3</b> Exemple de linéarisation de caractéristique [2]. ....	57
<b>Figure II. 4</b> Schéma représentatif d'une chaîne de mesure [4]. ....	58
<b>Figure II. 5</b> Schéma représentatif d'un capteur actif [7] .....	59
<b>Figure II. 6</b> Schéma représentatif d'un capteur passif [8]. ....	60
<b>Figure II. 7</b> Schéma représentatif d'un capteur composite [9] .....	60
<b>Figure II. 8</b> Composants de base d'un système de capteurs à fibre optique [20]. ....	62
<b>Figure II. 9</b> Exemples de capteurs à fibres (a) intrinsèques (b) extrinsèques [1]. ....	63
<b>Figure II. 10</b> Principe de fonctionnement d'un capteur optique (a) actif (b) passif [23]. ....	64
<b>Figure II. 11</b> Principe du réseau de Bragg [75]. ....	75
<b>Figure II. 12</b> Diffusion Raman et Brillouin [95]. ....	77

**Chapitre 3 : Résultats et discussion**

**Figure III. 1** Modélisations des structures par éléments finis [7]. ..... 101

**Figure III. 2** Les différentes étapes de la FEM [8]. ..... 102

**Figure III. 3** Maille élémentaire (3D) de Yee [12]. ..... 103

**Figure III. 4** Profils d'indice de la fibre proposée. (a) quand les trous sont remplis d'air. (b) quand les trous sont remplis de l'eau. (c) les paramètres géométriques la Fibre microstructurée. .... 107

**Figure III. 5** La variation de la dispersion chromatique avec et sans eau. .... 109

**Figure III. 6** L'indice de réfraction de l'eau en fonction de la longueur d'onde pour des différentes pression. .... 110

**Figure III. 7** La variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour des différentes pressions. .... 111

**Figure III. 8** La variation de la dispersion chromatique en fonction de la pression (a) Quand  $\lambda = 1.1\mu\text{m}$ . (b) Quand  $\lambda = 1.4\mu\text{m}$ . (c) Quand  $\lambda = 1.7\mu\text{m}$ . .... 112

**Figure III. 9** La sensibilité en fonction des longueurs d'onde ..... 113

**Figure III. 10** (a) une section transversale et (b) le profil des indices de la fibre proposée .. 116

**Figure III. 11** L'indice de réfraction de l'eau salé en fonction de longueur d'onde pour des différentes concentrations de la salinité. .... 117

**Figure III. 12** Variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde. .... 118

**Figure III. 13** (a) La sensibilité à  $1.3\mu\text{m}$ . (b) La sensibilité à  $1.55\mu\text{m}$ . .... 119

**Figure III. 14** (a) une section transversale une modification du diamètre  $d_1$  et (b) le profil des indices de la fibre proposée. .... 120

**Figure III. 15** La variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde de  $0,8\mu\text{m}$  à  $1,8\mu\text{m}$  avec différents niveaux de sel dans l'eau. .... 121

**Figure III. 16** (a) La sensibilité à  $1.3\mu\text{m}$ . (b) La sensibilité à  $1.55\mu\text{m}$ . .... 121

**Figure III. 17** (a) Section transversale de la PCF lorsque  $d_3=1.5\mu\text{m}$ . (b) Le profil d'indice de la structure. .... 122

**Figure III. 18** La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde avec différents niveaux de sel dans l'eau. .... 123

**Figure III. 19** (a) La sensibilité à  $1.3\mu\text{m}$ . (b) La sensibilité à  $1.55\mu\text{m}$ . .... 124

**Figure III. 20** L'indice de réfraction de l'eau, de la silice et de glucose en fonction de la longueur d'onde. .... 126

**Figure III. 21** (a) la fibre proposée (b) le profil d'indice de la fibre proposée ou les trous sont remplis de l'air (c) le profil d'indice de la fibre proposée ou les trous sont remplis de l'eau 127

**Figure III. 22** La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde avec et sans eau infiltré dans les trous. .... 128

**Figure III. 23** La variation de la dispersion chromatique à des différentes concentrations de glucose quand les trous sont remplis d'air. .... 129

**Figure III. 24** (a) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de  $1.1\mu\text{m}$ . (b) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de  $1.3\mu\text{m}$ . (c) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de  $1.55\mu\text{m}$ . .... 132

## Liste des Figures

---

<b>Figure III. 25</b> La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde à des différentes concentrations du glucose quand les trous sont remplis de l'eau. ....	1322
<b>Figure III. 26</b> (a) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.1 $\mu\text{m}$ . (b) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.3 $\mu\text{m}$ . (c) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.55 $\mu\text{m}$ . ....	1333
<b>Figure III. 27</b> (a) Le capteur PCF proposé et (b) l'indice de profil de la structure proposée. ....	1356
<b>Figure III. 28</b> La variation de la dispersion chromatique en fonction des longueurs d'onde avec différentes concentrations de 0 à 60 g/L. ....	137
<b>Figure III. 29</b> Les variations de la dispersion en fonction des différentes concentrations du HGB. (a) Sensibilité à 1.2 $\mu\text{m}$ . (b) Sensibilité à 1.4 $\mu\text{m}$ . ....	13838
<b>Figure III. 30</b> L'indice de réfraction du HGB en fonction de la concentration du HGB ..	14040
<b>Figure III. 31</b> L'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde pour le benzène, le xylène, le toluène, l'éthanol et l'air. ....	1432
<b>Figure III. 32</b> La structure de la fibre microstructurée proposée. ....	1445
<b>Figure III. 33</b> Le profil d'indice de la fibre proposée (a) air. (b) benzène .(c) Toluène. (d) Xylène. (e) Ethanol. ....	1455
<b>Figure III. 34</b> La variation de la dispersion chromatiques en fonction de la longueur d'onde pour l'air, le benzene, le toluene, le xylene et l'ethanol. ....	1466

# Liste des Tableaux

## Chapitre 1 : Généralités sur les fibres optiques

<b>Tableau I.1.</b> Caractéristiques générales des fibres monomodes et multimodes.....	17
<b>Tableau I.2</b> Développement des fibres à cristaux photoniques.....	20

## Chapitre 3 : Résultats et discussion

<b>Tableau III. 1</b> Développement des fibres à cristaux photoniques.....	108
<b>Tableau III. 2</b> Les résultats des sensibilités pour différentes longueurs d'onde .....	1245
<b>Tableau III. 3</b> Les paramètres géométriques de la structure proposée.....	1277
<b>Tableau III. 4</b> La sensibilité du capteur pour différentes longueurs d'onde de 1,1 $\mu\text{m}$ , 1,3 $\mu\text{m}$ et 1,55 $\mu\text{m}$ .....	1342
<b>Tableau III. 5</b> Comparaison de différents diagnostics de Malaria.....	1421
<b>Tableau III. 6</b> Indice de réfraction pour l'éthanol pour différentes longueurs d'onde [53] .....	1422
<b>Tableau III. 7</b> Les paramètres de l'équation pour le benzène, toluène, et le xylène [53] .....	1433

# Introduction Générale

Les fibres optiques constituent un pilier fondamental des télécommunications modernes, offrant une large bande passante, une immunité aux interférences électromagnétiques et une faible atténuation. Cependant, les fibres optiques conventionnelles présentent des limitations intrinsèques, notamment en termes de dispersion chromatique et de non-linéarité, qui limitent leur performance et leur utilisation dans certaines applications [1].

Pour surmonter ces limitations, une nouvelle génération de fibres optiques a émergé : les fibres à cristaux photoniques (PCF). Ces fibres, caractérisées par une structure périodique de trous d'air, offrent une flexibilité de conception inégalée, permettant de manipuler les propriétés optiques de la lumière guidée et de créer des effets uniques. La capacité de contrôler la dispersion, la biréfringence et l'aire effective des PCF ouvre un large éventail de possibilités pour des applications diverses [2].

L'utilisation de la fibre microstructurée continue d'être explorée dans de nombreux domaines, et de nouvelles avancées dans sa fabrication et sa conception sont susceptibles de conduire à de nouvelles applications et à des améliorations de performance dans un avenir proche. Ainsi, ces propriétés ont également permis une amélioration des capteurs à fibres optiques.

Les capteurs à fibres microstructurées offrent des solutions attrayantes pour les industries électroniques en raison de leur faible coût, de leur grande sensibilité, de leur petite taille, de leur robustesse, de leur flexibilité et de leur capacité de surveillance à distance [2-4]. Ils sont des dispositifs de mesure largement déployés dans une multitude de secteurs, allant de la surveillance environnementale à l'industrie médicale. Leur aptitude à transmettre et à contrôler la lumière avec précision en fait des outils polyvalents pour la détection et la mesure de diverses grandeurs physiques.

D'autres avantages justifient leur utilisation même dans des conditions défavorables telles que le bruit, les champs électromagnétiques intenses, les hautes tensions, les rayonnements nucléaires, ainsi que les environnements explosifs ou chimiquement corrosifs [5, 6]. En effet, malgré leurs excellentes performances, les propriétés intrinsèques de la silice imposent des restrictions à l'évolution de cette technologie [7]. La première restriction et la plus évidente, concerne la sélection du matériau pour le cœur et les trous afin d'assurer une similitude dans les propriétés thermiques, chimiques et optiques entre eux. D'autres limitations sont plutôt liées à

la géométrie et au profil d'indice de réfraction, ce qui restreint la possibilité d'ingénier librement des caractéristiques telles que les pertes inhérentes au matériau, la dispersion, la non-linéarité et la biréfringence [8]. Ces limitations et restrictions ont été examinées et affinées au cours de 30 années de recherche poussée, ce qui a permis de pousser la technologie des fibres à cristal photonique aussi loin qu'elle pourrait aller.

Différents types de capteurs à fibres à cristal photonique sont aujourd'hui disponibles sur le marché à un coût relativement bas. Ces dispositifs sont devenus commercialement intéressants en étant intégrés à des électroniques de détection et de traitement de signal pratiques. Cependant, les capteurs à fibres à cristal photonique innovants promettent un nombre croissant de fonctionnalités dans la mesure d'une grande variété de paramètres physiques. Par conséquent, un volume considérable de littérature scientifique a été produit sur ce sujet au cours des dernières décennies. Plusieurs prototypes de laboratoire ont été construits et caractérisés, ouvrant la voie à de nouveaux dispositifs de mesure réalisables. Compte tenu de l'application extrêmement large des capteurs à fibres optiques, un intérêt croissant est alimenté par les besoins des domaines industriel, médical, militaire et civil [9-11]. À titre d'exemples, en mécanique pour mesurer la rotation [12], les vibrations [13], l'accélération [14], la flexion [15], la torsion [16], le déplacement [17], la contrainte [18]; en surveillance environnementale pour mesurer la température [19], la pression [20], les gaz [21], les contaminants chimiques [22]; en biomédecine et en diagnostic médical pour détecter les biomolécules et les concentrations de composés dans les fluides biologiques [23, 24]. Les points forts bien connus des capteurs à fibres optiques sont leur compacité, qui permet de les loger dans des parties mécaniques d'une grande variété de dispositifs et de systèmes sans affecter leur fonctionnement, le poids minimal, l'immunité aux interférences électromagnétiques, la haute sensibilité.

Ce travail de recherche s'intéresse à l'exploration du potentiel des PCF dans le domaine de la détection, en particulier pour développer des capteurs à haute sensibilité et à performance optimale. Nous nous focalisons sur la modélisation numérique des PCF, une étape cruciale pour l'optimisation et la conception de ces capteurs. Les contributions majeures de cette thèse résident dans :

- L'amélioration de la sensibilité des capteurs à base de PCF : Ce travail présente des designs innovants de PCF pour la détection de la pression, de la salinité, du glucose, de la malaria et de substances chimiques, en maximisant la sensibilité du capteur en utilisant une approche basée sur les caractéristiques de dispersion chromatique.

## Introduction générale

---

- L'intégration de différentes méthodes de modélisation numérique : La méthode des éléments finis (FEM), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) et la méthode de propagation des faisceaux (BPM) ont été étudiées et comparées. La BPM s'est avérée la méthode la plus efficace pour simuler les PCF dans le contexte de cette étude, permettant une analyse approfondie des propriétés de propagation de la lumière.
- L'identification des paramètres clés influant sur la sensibilité : L'étude examine l'impact des paramètres géométriques des PCF, tels que le diamètre et l'espacement des trous d'air, ainsi que la nature du milieu infiltré, sur la sensibilité des capteurs.

Les résultats de cette thèse ouvrent des perspectives prometteuses pour le développement de nouveaux capteurs à base de PCF, proposant des solutions innovantes pour divers domaines d'application, notamment la santé, l'environnement, l'industrie et les technologies de pointe.

Ce travail de recherche s'articule autour d'une étude approfondie des fibres à cristaux photoniques (PCF) pour la réalisation de capteurs à haute sensibilité. La thèse est structurée en trois chapitres, explorant les différents aspects de la conception et de la modélisation de ces capteurs :

Chapitre I: Généralités sur les fibres optiques : Ce chapitre présente les principes fondamentaux des fibres optiques, en mettant l'accent sur les fibres conventionnelles et les fibres à cristaux photoniques (PCF). Il analyse les propriétés optiques essentielles des PCF, telles que la dispersion, la biréfringence et l'aire effective, et explore les mécanismes de guidage de la lumière dans ces structures.

Chapitre II: Généralité sur les capteurs: Ce chapitre explore les principes de fonctionnement des capteurs classiques et des capteurs optiques. Il examine les différentes caractéristiques des capteurs, telles que la sensibilité, la résolution et la limite de détection. Ce chapitre analyse également les différents types de capteurs optiques, en particulier les capteurs à fibres optiques localisés et les capteurs à fibres optiques distribués.

Chapitre III: Résultats et Discussions: Ce chapitre présente les résultats de la modélisation numérique des PCF pour la conception de capteurs. Il détaille les méthodes de simulation utilisées (FEM, FDTD et BPM) et les résultats obtenus pour des capteurs de pression, de salinité, de glucose, de malaria et de substances chimiques. L'analyse de l'impact des paramètres géométriques sur la sensibilité des capteurs est également présentée.

## **Introduction générale**

---

Ce travail de recherche contribue à l'avancement des capteurs à fibre optique en explorant une application spécifique dans le domaine de la mesure de la salinité, la pression, le glucose et la détection biochimique. Les résultats obtenus pourraient servir de base pour le développement de capteurs plus sensibles et précis dans ce domaine, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour la surveillance et la gestion des ressources aquatiques.

Une conclusion générale, récapitulant notre apport, marque la fin du travail exposé dans cette thèse.

### Références

- [1] M. Butt, S. N. Khonina, N. Kazanskiy, "Recent advances in photonic crystal optical devices: A review", *J Optics Laser Technology*, 142, 107265, 2021.
- [2] L. Alwis, T. Sun, K. Grattan, "Developments in optical fibre sensors for industrial applications", *J Optics Laser Technology*, 78, 62-66, 2016.
- [3] G. Rajan, "Optical fiber sensors: advanced techniques and applications", CRC press, 2017.
- [4] C. Zhu, H. Zheng, O. Alsalman, W. Naku, L. Ma, "Simultaneous and Multiplexed Measurement of Curvature and Strain Based on Optical Fiber Fabry-Perot Interferometric Sensors", *Photonics*, MDPI, 2023.
- [5] F. Esposito, D. Burnat, R. Mihalcea, D. Negut, A. Srivastava, S. Campopiano, L. Sansone, M. Giordano, A. Stancalie, A. Iadicicco, "Optical properties of thin films monitored in real-time at high gamma radiation doses using long period fiber gratings", *J Optics Laser Technology*, 176, 111019, 2024.
- [6] D. Lyu, J. Peng, Q. Huang, W. Zheng, L. Xiong, M. Yang, "Radiation-resistant optical fiber Fabry-Perot interferometer used for high-temperature sensing", *J IEEE Sensors Journal*, 21, 57-61, 2020.
- [7] M. Jonard, "Influence des paramètres structuraux de la silice sur la non-linéarité quadratique imprimée dans les fibres optiques multimodes", Université de Limoges, 2023.
- [8] W. Shi, Y. Tian, A. Gervais, "Scaling capacity of fiber-optic transmission systems via silicon photonics", *J Nanophotonics*, 9, 4629-4663, 2020.
- [9] S. Jain, K. Choudhary, S. Kumar, "Photonic crystal fiber-based SPR sensor for broad range of refractive index sensing applications", *J Optical Fiber Technology*, 73, 103030, 2022.
- [10] M. Kiroriwal, P. Singal, "Photonic Crystal Fiber Plasmonic Sensor for Applications in Medicine", CRC Press, 51-76, 2023.
- [11] S. S. Misty, M. A. Hossain, M. S. Miah, B. Bhowmik, S. M. Aunik, S. K. Biswas, "Photonic Crystal Fiber Based Sensor for Air Pollution Monitoring", 2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), IEEE, 2022.

- [12] A. Azmi, A. Abdullah, M. M. Noor, M. Ibrahim, R. R. Ibrahim, T. TanJ. Zhang, "Dynamic bending and rotation sensing based on high coherence interferometry in multicore fiber", *J Optics Laser Technology*, 135, 106716, 2021.
- [13] C. Han, C. Zhao, H. DingC. Chen, "Temperature-insensitive polarimetric vibration sensor", *J Optics letters*, 47, 2714-2717, 2022.
- [14] G. Zhang, X. Wu, Q. Ge, S. Li, W. Zhang, J. Shi, L. GuiB. Yu, "Axial strain applied in-fiber Mach-Zehnder interferometer for acceleration measurement", *J Optics Express*, 28, 18596-18606, 2020.
- [15] C. Yang, Y. Kuai, Z. Cao, F. Xu, Y. Liu, K. Xie, S. Li, B. YuZ. Hu, "Multiparameter Sensor Based on Cascaded Micro-Tapered Long Period Fiber Gratings", *J IEEE Sensors Journal*, 2024.
- [16] F. Zhang, Y. Wang, Z. Bai, S. Liu, C. Fu, Y. Huang, C. LiaoY. Wang, "Helicity enhanced torsion sensor based on liquid filled twisted photonic crystal fibers", *J Sensors*, 20, 1490, 2020.
- [17] C. Zhu, Y. Zhuang, B. LiuJ. Huang, "Review of fiber optic displacement sensors", *J IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 71, 1-12, 2022.
- [18] N. Islam, M. F. H. Arif, M. A. YousufS. Asaduzzaman, "Highly sensitive open channel based pcf-spr sensor for analyte refractive index sensing", *J Results in Physics*, 46, 106266, 2023.
- [19] A. B. Siddik, S. Hossain, A. K. Paul, M. RahmanA. Mollah, "High sensitivity property of dual-core photonic crystal fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance", *J Sensing Bio-Sensing Research*, 29, 100350, 2020.
- [20] L. Chen, J. Tian, Q. Wu, J. Li, Y. YaoJ. Wang, "Temperature-insensitive gas pressure sensor based on photonic crystal fiber interferometer", *J IEEE Sensors Journal*, 2023.
- [21] A. Abbaszadeh, S. MakoueiS. Meshgini, "New hybrid photonic crystal fiber gas sensor with high sensitivity for ammonia gas detection", *J Canadian Journal of Physics*, 100, 129-137, 2022.
- [22] R. H. Jibon, S. Biswas, S. BiswasN. F. I. Nira, "Poisonous chemical detection in the THz regime using PCF: Design and numerical investigation", *J Journal of Optics*, 50, 671-680, 2021.
- [23] R. Pravesh, D. Kumar, B. P. Pandey, V. S. ChaudharyS. Kumar, "Design and analysis of a double D-shaped dual core PCF sensor for detecting biomolecules in the human body", *J IEEE Sensors Journal*, 2024.

- [24] S. Jain, K. ChoudharyS. Kumar, "Novel Materials–Based Photonic Crystal Fiber Sensor for Biomedical Applications", J Plasmonics, 1-14, 2023.

Chapitre I

**Généralités sur les fibres optiques**

### I.1. Introduction

Les fibres optiques ont été l'une des réussites technologiques les plus phénoménales du 20<sup>ème</sup> siècle et elles sont devenues l'un des principaux outils de communication. Cette technologie s'est développée à un rythme incroyable, depuis les premières fibres optiques à faible perte (moins de 20 dB/km) en 1970 jusqu'aux composants clés des systèmes modernes.

Les fibres optiques monomodes conventionnelles, qui transmettent des informations sous forme d'impulsions optiques courtes sur de longues distances à des vitesses exceptionnellement élevées, sont devenues incontournables dans les domaines des radiocommunications. En effet, les fibres optiques peuvent fournir une large bande passante de plus elles sont insensibles aux interférences électromagnétiques (EMI), aux ondes radio électromagnétiques (EMI) et aux interférences radioélectriques (RFI). Les fibres optiques sont utiles pour de nombreuses applications de communications militaires et civiles où la qualité du signal, la sécurité de la transmission des données et la capacité de survie sont essentielles.

En raison du rôle essentiel que joue la fibre optique dans notre vie, les chercheurs et les ingénieurs de plusieurs laboratoires à travers le monde travaillent sur les moyens d'améliorer cette technologie. En particulier, ils consacrent beaucoup d'efforts à la création de nouveaux types de fibres optiques avec des propriétés optiques améliorées et des coûts inférieurs aux fibres optiques traditionnelles. Dans les années 1980, les physiciens optiques ont reconnu que la capacité de structurer des matériaux à l'échelle de la longueur d'onde optique, de l'ordre du micromètre, permettrait de développer de nouveaux matériaux optiques connus sous le nom de cristaux photoniques. De nombreux groupes de recherche étudient ces matériaux dans des géométries bidimensionnelles et tridimensionnelles et les utilisent pour former de nouveaux types de fibres optiques. Ces fibres sont connues sous le nom de fibres à cristaux photoniques (PCF), car elles s'appuient sur les propriétés inhabituelles des cristaux photoniques pour offrir des performances inaccessibles pour les guides d'ondes à fibres optiques conventionnelles.

La fibre optique est présentée en bref dans ce chapitre, ainsi que les différents mécanismes de diffusion de la lumière qui les distinguent des fibres monomodes. Ensuite, la nouvelle génération des fibres, les fibres à cristaux photoniques, sera décrite. Nous allons déterminer leur principe de guidage ainsi ces différents types. Un aperçu sur les caractéristiques des fibres microstructurées comme la dispersion, la biréfringence et l'aire effective. A la fin de ce chapitre, nous allons montrer le processus de fabrication et leur domaine d'applications.

### I.2. La fibre optique conventionnelles

#### I.2.1. Qu'est-ce qu'une fibre optique ?

Les fibres optiques sont composées de verre solide entouré de feuilles de verre concentriques. C'est un diélectrique cylindrique, guide d'ondes, qui fonctionne à des fréquences optiques. Ces fibres sont utilisées pour transmettre la lumière à long terme et une bande passante plus élevée. La lumière est guidée par le phénomène de réflexion interne totale [1, 2]. Ces fibres optiques ont de nombreux avantages tels qu'une forte capacité de transport d'informations et de faibles interférence, bande passante élevée, poids léger et petit diamètre. Figure I.1 montre la structure de la fibre optique [3].

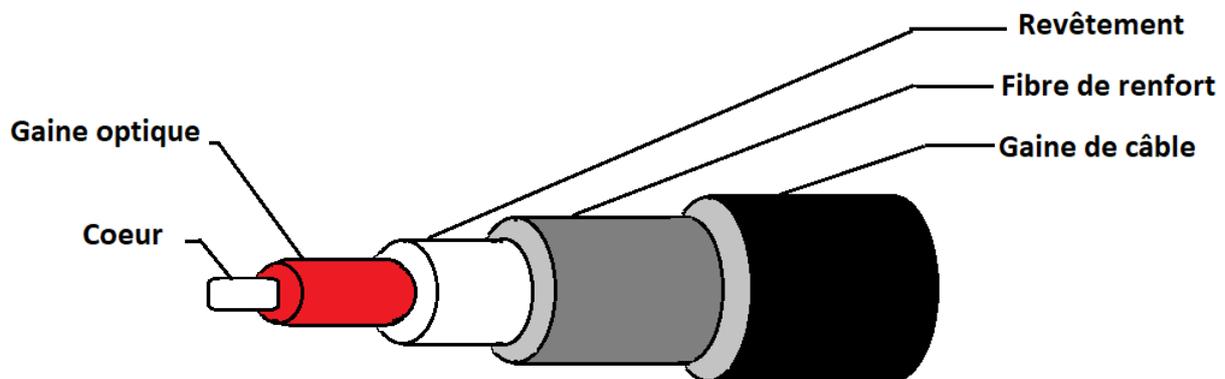


Figure I.1 Structure d'un guide optique [4]

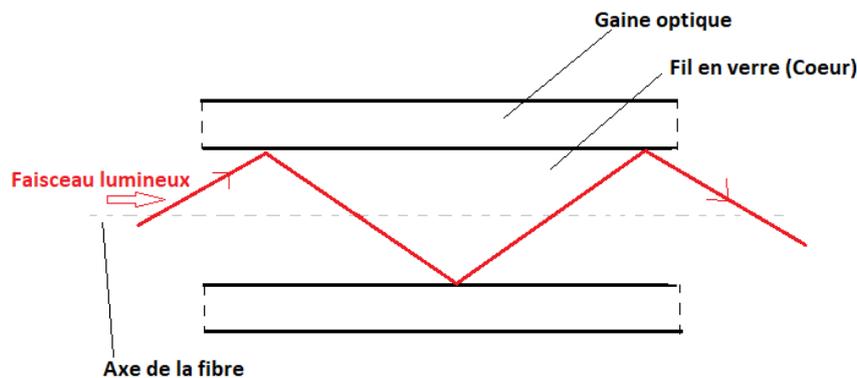
##### I.2.1.1 Composition générale

Une fibre optique est présentée par un mince filament de verre et elle se compose en réalité d'un noyau ou un cœur cylindrique en matériau transparent d'un indice de réfraction  $n_1$  et d'une gaine concentrique en matériau d'indice de réfraction  $n_2$  qu'il est inférieur à  $n_1$ . Selon le type des fibres, le diamètre du cœur est compris entre  $8 \mu\text{m}$  à  $62.5 \mu\text{m}$  tandis que l'épaisseur de la gaine est d'environ  $125 \mu\text{m}$ . Ainsi que les valeurs typiques de l'indice réfractif du cœur de la fibre optique est  $n_1=1.48$  [5].

### I.2.1.2 Principe de guidage et processus de réflexion totale interne RTI

L'indice de réfraction du cœur de la fibre est légèrement supérieur à celui de la gaine (Des millièmes de différence), de sorte que la lumière qui est entièrement réfléchie peut-être confinée plusieurs fois.

Un manchon de protection en plastique recouvre la liaison à travers deux matériaux (due au phénomène de réflexion interne totale). Plusieurs réflexions internes totales sont subies par un rayon lumineux lorsqu'il pénètre à l'extrémité d'une fibre optique à un angle approprié. Ce faisceau continue de se propager en zigzag jusqu'à la pointe de la fibre optique. Même lorsque la fibre est courbée, la lumière se propage à travers elle avec peu de perte. Figure I.2 présente le guidage de la lumière dans la fibre optique [6].



**Figure I.2.** Guidage de la lumière dans un guide optique [7]

Les fibres optiques sont des guides d'ondes qui utilisent les caractéristiques de réfraction de la lumière. Le principe de la réflexion sert à la base du guidage de la lumière dans les fibres optiques. L'interface entre le cœur  $n_1$  et la gaine optique  $n_2$  est différente de l'indice de réfraction total, avec  $n_1 > n_2$ .

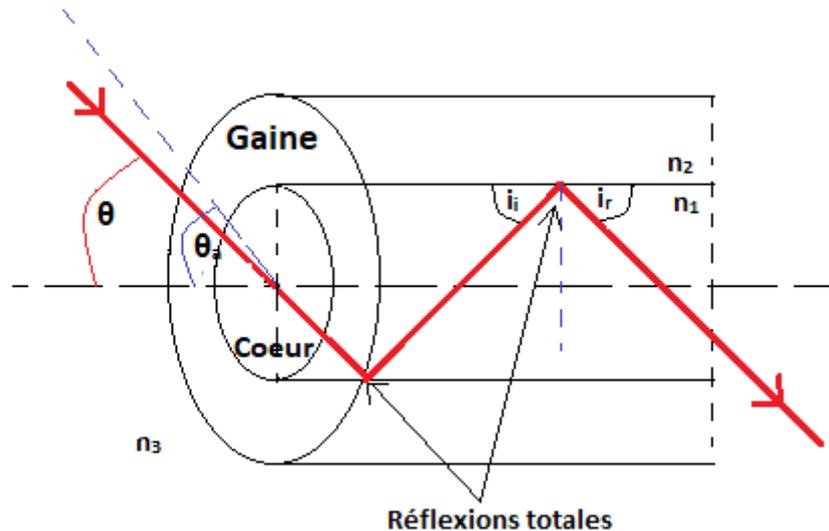
Cependant, on sait qu'un rayon d'angle incident  $i_i$  est dévié avec un angle  $i_r$  lors de la transition d'un milieu avec un indice de réfraction  $n_1$  à un environnement avec un indice de réfraction  $n_2$  comme suit :

$$n_1 \sin i_i = n_2 \sin i_r \quad \text{I.1}$$

Si l'angle d'incidence satisfait aux conditions suivantes [8] :

$$i_r > \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad \text{I.2}$$

Dans ce cas, le faisceau n'est plus réfracté et il est réfléchi. L'ajout d'un deuxième milieu qui a un indice de réfraction  $n_2$  provoque le piégeage du rayon dans le milieu  $n_1$  par réflexion continue à l'interface (entre gaine et cœur de la fibre optique), comme illustré sur la figure I.3 :



**Figure I.3.** Guidage de la lumière dans le milieu d'indice  $n_1$  dans une fibre conventionnelle par réflexion totale interne RTI.

Le concept de la réflexion interne totale induite dans les fibres optiques est représenté schématiquement sur la figure I.3. Le mécanisme de guidage peut être facilement interprété en utilisant une approche d'optique géométrique simple : si  $n_1 > n_2$ . Un rayon se propage dans le cœur et arrivant sous un angle supérieur à l'angle critique à l'interface cœur-gaine subit une réflexion interne totale. On a donc un guidage par réflexion totale RTI, on introduit une grandeur supplémentaire (notée  $\theta$ ) qui est liée à l'angle d'incidence du faisceau sur la face d'entrée de la fibre. D'après l'équation 1, et si l'angle d'incidence ( $\theta$ ) est inférieur à l'angle critique ( $\theta_a$ ), appelée aussi « angle d'acceptance », qui est indiquée par [9] :

$$\theta_a = \arcsin \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_3^2}} \quad \text{I.3}$$

Ou  $n_3$  est l'indice du milieu extérieur dans lequel est trempé la fibre qui est généralement l'air avec  $n_3=1$ . Dans ce cas, les rayons sont guidés uniquement dans le cœur. La valeur du sinus de cet angle, est interpellé « Ouverture Numérique » qui désigne cette capacité des fibres à capter la lumière dans le cœur :

$$\text{ON} = \sin(\theta_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{I.4}$$

Plus l'ouverture numérique est grande, plus l'angle d'acceptation est grand. D'emblée, il semble souhaitable que l'ouverture numérique soit la plus élevée possible. La force de guidage d'un guide optique est présentée par la relation suivante [10] :

$$\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2} = \frac{\text{ON}^2}{2n_1^2} \quad \text{I.5}$$

Pour la plupart des fibres optiques,  $\Delta$  est inférieure à 0.01, les indices de cœur et de gaine changent légèrement.

### **I.2.1.3 Mode de propagation d'une fibre conventionnelle**

Il n'est pas possible de déterminer la condition incidente (ouverture numérique) de la fibre optique d'après ce qu'on a vu précédemment. Cependant, Il est conçu pour expliquer la propagation du rayonnement dans la fibre. En fait, selon cette approche purement géométrique, tous les angles d'incidence  $i$  tels que  $i < \frac{\theta_{\max}}{2}$  sont convenables, ce qui n'est en fait pas le cas. La résolution de ce problème nécessite une approche ondulatoire [11].

La solution à l'équation de propagation du guide est de la forme suivante, compte tenu des conditions aux limites :

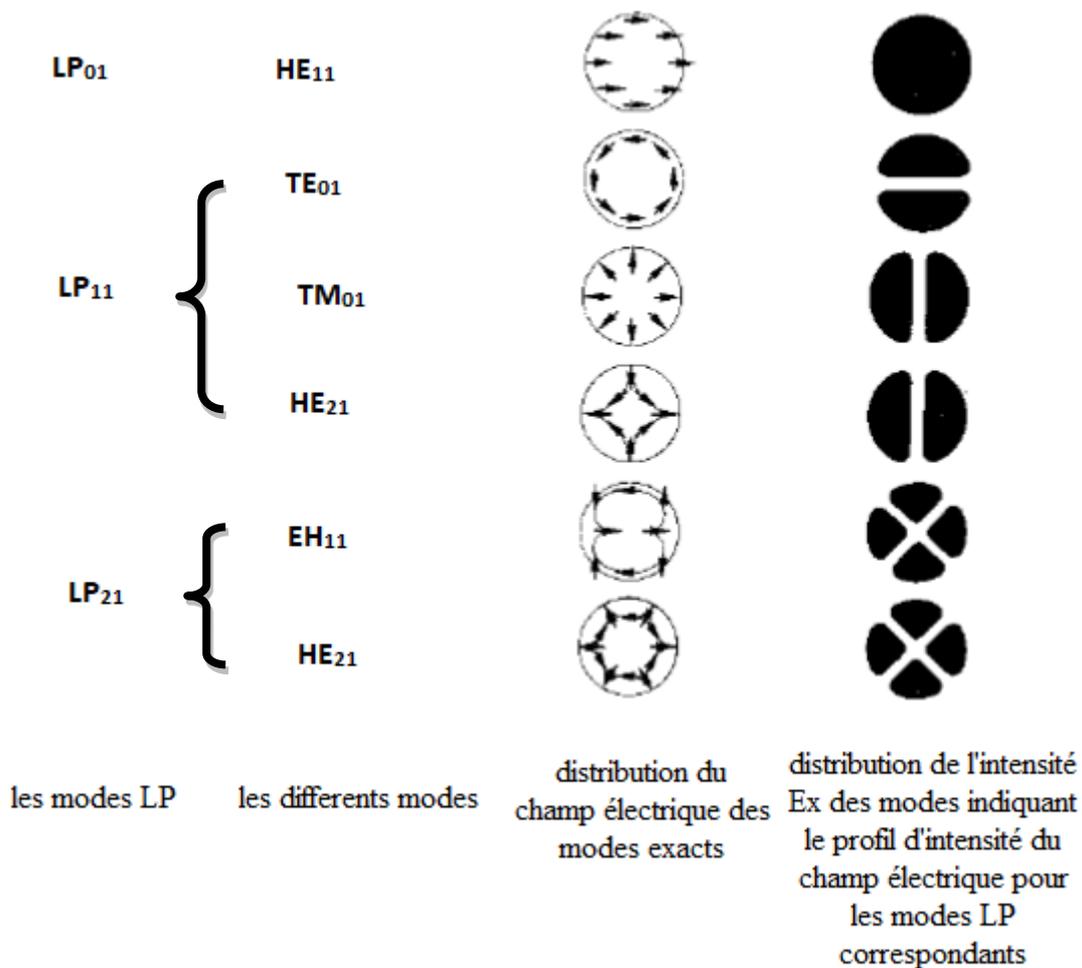
$$\left[ \frac{J'_v(u)}{uJ_v(u)} + \frac{K'_v(v)}{vK_v(v)} \right] \cdot \left[ \frac{k_c^2 J'_v(u)}{uJ_v(u)} + \frac{k_g^2 K'_v(v)}{vK_v(v)} \right] = \beta^2 v^2 \left[ \frac{1}{u^2} + \frac{1}{v^2} \right] \quad \text{I.6}$$

Dans cette formule, les fonctions  $J'_v(u)$  et  $K'_v(v)$  sont des fonctions de Bessel,  $v$  est un nombre entier azimutal,  $u$  et  $v$  sont des constantes de propagation définies comme suit :

$$u = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2} \quad \text{I.7}$$

$$v = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2} \quad \text{I.8}$$

Où  $\beta$  est la composante du vecteur d'onde sur l'axe de propagation de la fibre et  $k_0$  est le nombre d'onde dans le vide avec  $k_0 = \frac{\omega}{c}$ ,  $k_1 = n_1 k_0$ ,  $k_2 = n_2 k_0$ .



**Figure I.4.** Représentation du profil d'intensité des trois modes LP [12].

Il y a un nombre fini de solutions à l'équation I.6 pour chaque valeur du nombre azimutal  $v$ . Il y a un ensemble de solutions discrètes appelées  $\beta_{v,\mu}$  pour la constante de propagation, car  $u$ ,  $v$  et  $\beta$  sont reliés entre eux. Les modes de propagation de la structure comprennent les ondes planes associées. En terme optique géométrique, un seul nombre discret

d'angles permet une propagation sans pertes dans la fibre. Si  $v$  est nul, on aura les modes transverses électriques TE et magnétiques TM. En revanche, ce sont les modes hybrides EH et HE [13].

La fréquence normalisée qui est définie par :

$$V^2 = u^2 + v^2 \quad \text{I.9}$$

Comme elle peut s'écrire comme sous la forme :

$$V = ka \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} ON \quad \text{I.10}$$

Ou a présente le rayon du cœur de la fibre.

Alors, pour  $V < 2.405$ , uniquement le mode fondamental  $LP_{01}$  ( $HE_{11}$ ) se propage [14], la fibre est alors dite une fibre monomode. Sinon, si  $V > 2.405$ , le mode  $LP_{11}$  ( $TM_{01}$   $TE_{01}$ ) se propage, par conséquent la fibre devient multimode [15]. La figure I.4 représente les profils d'intensité lumineuse des trois modes guidés  $LP_{1m}$ .

La fréquence normalisée indique directement le nombre de modes  $N$  qu'une fibre multimode peut propager en utilisant l'approximation :  $N=V^2/2$  [16]. La longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  peut être associée à la valeur  $V=2.405$  qui détermine le passage du régime monomode au régime multimode [16] :

$$\lambda_c = \frac{2\pi a ON}{2.405} \quad \text{I.11}$$

A partir de cette équation, on peut calculer le rayon maximal du cœur pour une fibre monomode [16] :

$$a_{\max} = \frac{2.405\lambda}{2\pi ON} \quad \text{I.12}$$

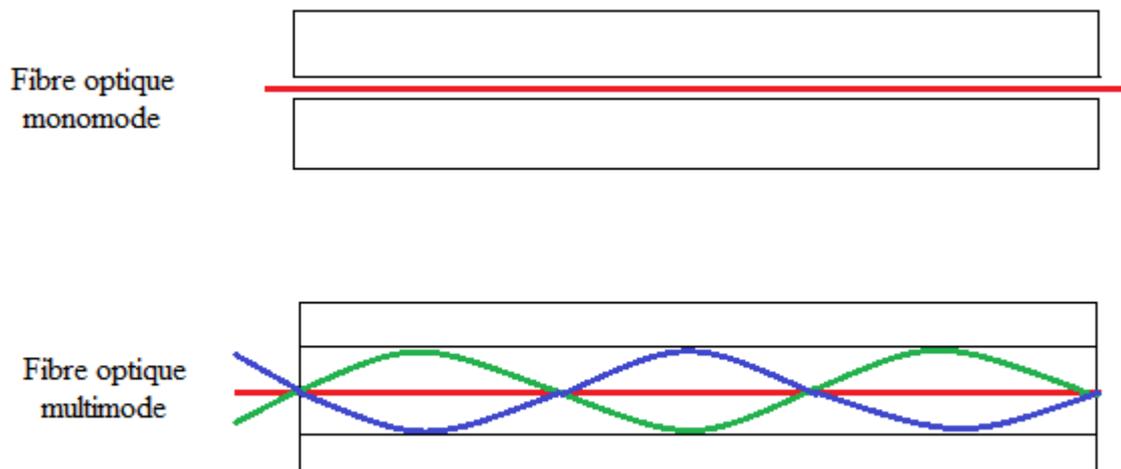
### I.2.1.4 Les différentes catégories de fibres optiques silices

On peut distinguer deux grandes familles de fibres : les fibres multimodes et les fibres monomodes, schématisé sur la figure I.5. La différence entre ces deux familles est la dimension du cœur, ou il est de 10  $\mu\text{m}$  pour les fibres monomodes et généralement de 50  $\mu\text{m}$  à 62.5  $\mu\text{m}$  pour les fibres multimodes [17] .

Comme le montre la figure I.5, Si un seul chemin optique est envisageable pour la lumière, une fibre est unimodale et à l'inverse, une fibre est multimode. La fréquence normalisée noté  $V$  permet de définir la catégorie dans laquelle se situe la fibre [16] :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{I.13}$$

Avec  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière,  $a$  est le diamètre de cœur,  $n_1$  est l'indice de cœur et  $n_2$  est l'indice de la gaine. Une comparaison des caractéristiques de ces deux familles de fibres optiques est présentée sur le tableau I.1.



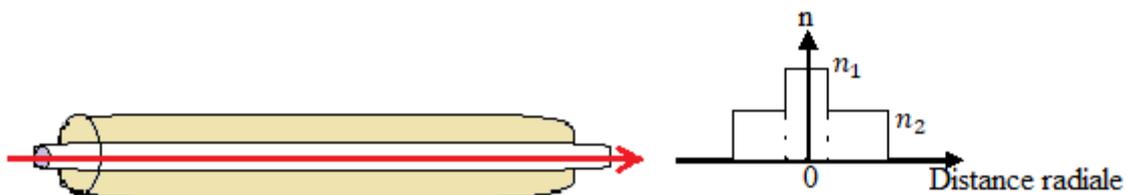
**Figure I.5.** Les deux familles de fibres optiques [18]

**Tableau I.1.** Caractéristiques générales des fibres monomodes et multimodes

Fibre monomode	Fibre multimode
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Ouverture numérique ON faible (connexion délicate)</li><li>○ Très faible atténuation</li><li>○ Faible dispersion</li><li>➤ Haut débit longue distances</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ ON forte (connexion facile)</li><li>○ Faible atténuation</li><li>○ Forte dispersion</li><li>➤ Réseaux locaux</li></ul>

a. Fibres optiques monomodales :

La fibre monomode a un diamètre de cœur de 10 microns, plus petit que le diamètre de la gaine qui peut être 125 microns et sont à peu près à l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée. Le principe de ces fibres est qu'il n'y a pas de dispersion modale et l'onde se propage sans réflexion. Les diodes laser fournissent une grande puissance d'émission car les fibres monomodes ont un petit diamètre du cœur. Le mode fondamental est utilisé pour la propagation dans les fibres monomodes comme indiqué sur la figure I.6.



**Figure I.6.** Fibre monomode

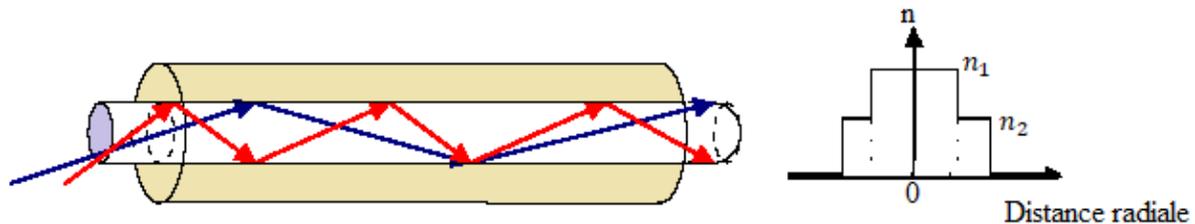
b. Fibres optiques multimodales :

Le diamètre du cœur des fibres multimodes est important (de 50 à 85 microns). Le rayon lumineux pénètre dans le cœur de la fibre et se propage longitudinalement jusqu'à l'extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface entre le cœur et la gaine.

Cette classe de fibre optique diffuse plusieurs modes (chemins optiques). Les rayons arrivent avec des moments différents en fonction des différentes routes qu'ils empruntent. Cela entraîne une dispersion importante du signal lumineux en raison de la multiplication des modes de propagations (dispersion modale).

- Fibres optiques multimodes à saut d'indice :

L'indice de réfraction du cœur de la fibre de ce type reste constant, mais il diminue soudainement à l'interface gaine-cœur, provoquant un saut d'indice dans la gaine. la figure I.7 montre un schéma d'une fibre à saut d'indice.

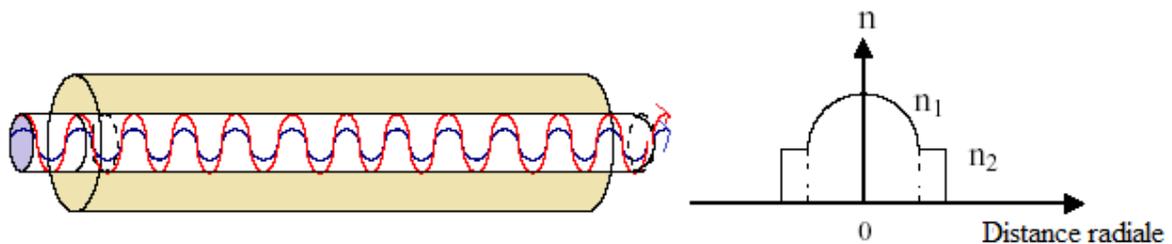


**Figure I.7.** Fibre multimode à saut d'indice

Parmi les avantages de ce type de fibres : Peu coûteux, facile à mettre en place. Tandis que l'inconvénient principale est la perte et la distorsion importante du signal.

- Fibres optiques multimodes à gradient d'indice :

Le cœur a un indice de réfraction variable de ce type de fibre, il diminue progressivement du centre du cœur jusqu'à la limite de la surface entre le cœur et la gaine comme présenté sur la figure I.8.



**Figure I.8.** Fibre multimode à gradient d'indice

Les deux avantages de ce type de fibre sont les suivants :

- Bande passante raisonnable
- Excellente transmission.

En revanche, les inconvénients incluent la difficulté à mettre en œuvre.

### I.2.2. Applications aux télécommunications

Les télécommunications utilisent la fibre optique pour transmettre des informations, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. Il est probable que ce soit l'un des domaines où le fonctionnement de la fibre optique est le plus crucial et où il y a le plus d'avenir. Le fil de cuivre, contrairement à la fibre optique, ne peut supporter que quelques communications. Assurément, la fibre optique est plus coûteuse sur des longues distances car elle a moins de composants. En termes de performances de transmission, elle s'est avérée rivaliser avec le câble en cuivre et les ondes radio (très faible atténuation, très grande bande passante, multiplexage possible), d'avantages de mise en œuvre (très petite taille, grande souplesse, faible poids), de sécurité électrique [19], électromagnétique [20] et industrielle [21], ainsi que de plus en plus en termes économiques [22]. Ensuite, les fibres sont utilisées, en particulier pour les réseaux à haut débit. Avec une atténuation très faible, ils ont une capacité de transmission de l'ordre du gigabit par seconde, et on peut atteindre la centaine de Gbits/s grâce aux multiplexages. En 1980, à Paris, un réseau urbain en fibre optique a été créé entre deux centrales téléphoniques [23]. En 1982, les premières commandes ont été données et les réalisations importantes ont commencé en 1983 [24]. En 1987, les fibres monomodes ont été introduites [25]. En ce moment, trois quarts des fibres sont implantées entre des centres téléphoniques en région parisienne. Avec une vitesse de 34 Mbits/s, ils ne nécessitent pas de répéteurs [26].

### I.3. Les fibres microstructurées

#### I.3.1. Qu'est qu'une fibre optique microstructurée ?

Le terme « fibre à cristaux photoniques » connues encore sous le nom « fibre microstructurée » a été inventé par Phillips St. J. Russel au début des années 1990 [27]. Un aperçu du développement des fibres à cristaux photoniques est indiqué dans le tableau I.2. Les fibres à cristaux photoniques (PCF) sont des fibres à structure périodique constitué de trous, remplis d'air, disposés pour former un réseau hexagonal qui s'étendent sur toute la longueur de la fibre. Ces fibres offrent des caractéristiques nouvelles et améliorées et qui surmontent les limites des fibres optiques conventionnelles. Les lumières peuvent se propager le long des fibres dans les défauts de leur structure cristalline.

Avec le temps, grâce aux progrès de la technologie de fabrication, de nombreuses nouvelles structures telles que les PCF triangulaires [28], circulaires [29], carrées [30], octogonales [31],

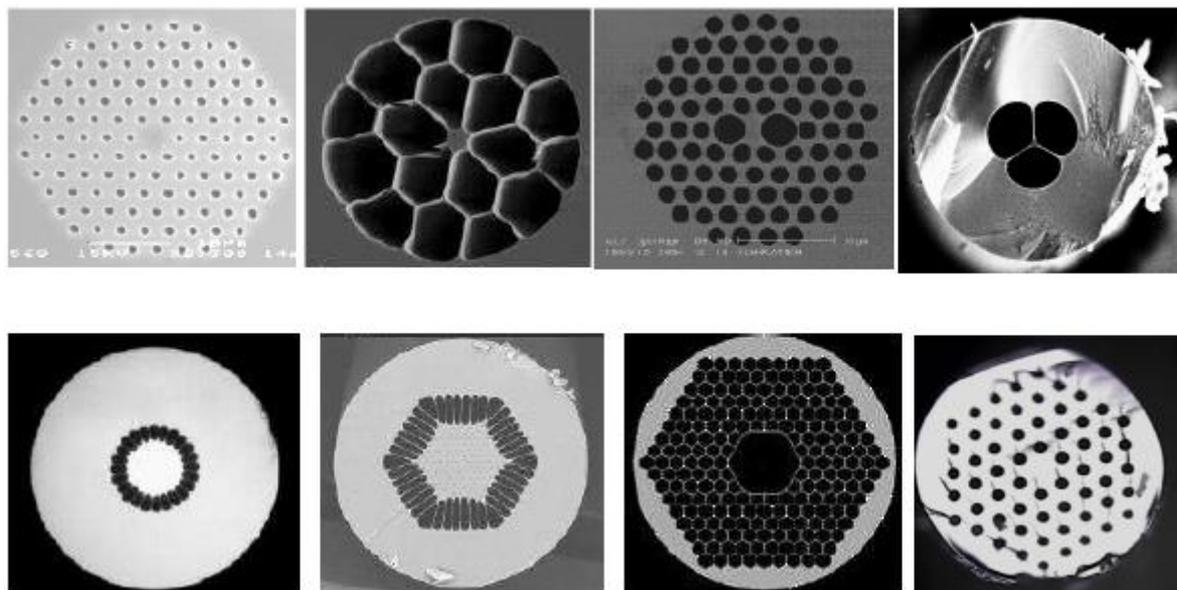
hybrides [32], décagonales [33] et en nid d'abeille [34] ont été conçues pour obtenir des propriétés guidées décentes. Pour améliorer les performances des structures de fibres à cristaux photoniques, différents matériaux tels que la silice [27], la tellurite [35], le téflon [36], le PMMA [37] et le topas [38] sont utilisés. En effet, grâce aux progrès de la technologie de fabrication, les PCF présentent une faible perte de confinement [39], une sensibilité élevée [40], une grande ouverture numérique [41], une non-linéarité élevée [42], une grande zone de mode [43], une biréfringence élevée [44], une dispersion ultra-aplatie [45], une dispersion plate nulle [46] et une faible perte de courbure [47].

**Tableau I.2** Développement des fibres à cristaux photoniques

<b>1978</b>	L'idée de recouvrir le cœur d'une fibre d'un réseau de Bragg [48]
<b>1992</b>	L'idée d'une fibre à cristaux photoniques à trou d'air [49]
<b>1996</b>	Fabrication d'une fibre monomode avec revêtement [50]
<b>1997</b>	Fibre à cristaux photoniques à mode unique sans fin [51]
<b>1999</b>	Fibre à cristaux photoniques avec une bande interdite photonique et un cœur rempli d'air [52]
<b>2000</b>	Fibre à cristaux photoniques à une haute biréfringence [53]
<b>2000</b>	Génération de supercontinuum avec les fibres à cristaux photoniques [54]
<b>2001</b>	Fabrication d'une fibre de Bragg [55]
<b>2001</b>	Laser à fibre à cristaux photoniques à double gaine [56]
<b>2002</b>	Fibre à cristaux photoniques à dispersion ultra-atténuée [57]
<b>2003</b>	Fibre de Bragg avec un cœur de silice et d'air [58]
<b>2004</b>	Fibre à cristaux photoniques en chalcogénide [59]
<b>2005</b>	PCF à réseau de Kagome [60]
<b>2006</b>	PCF hybride [61]
<b>2007</b>	Technique de double inversion du silicium pour la fabrication de gabarits polymères pour les cristaux photoniques [62]
<b>2009</b>	Fibre à bande interdite photonique à cœur creux [63]
<b>2010</b>	Développement d'un spectromètre femtoseconde à base d'une fibre à cristaux photoniques et photophysique ultra-rapide du vert de Malachite [64]
<b>2011</b>	Les modes de résonance acoustique dans les fibres optiques microstructurées- Applications aux capteurs répartis [65]

## Chapitre I : Généralités sur les fibres optiques

2012	Etude de l'influence des dispersions d'ordres supérieurs sur le résonateur à fibre cristal photonique [66]
2013	Cristaux photoniques à sept cœurs à double gaine [67]
2014	Capteurs de nano déplacement basés sur la PCF[68]
2015	Conception d'une PCF équi-angulaire [69]
2015	Intégration d'un laser à fibre PCF [70]
2016	Conception d'une fibre à cristaux photoniques pour la détection de liquides [71]
2017	Capteurs plasmiques à base de fibres à cristaux photoniques [72]
2018	Capteur de salinité utilisant une fibre à cristal photonique [73]
2019	Approche d'apprentissage automatique pour le calcul des propriétés optiques d'une fibre à cristal photonique [74]
2020	Guides d'ondes imprimés en 3D à partir de fibres à cristaux photoniques pour des dispositifs photoniques complexes à l'extrémité des fibres [75]
2021	Capteur à fibre à cristaux photoniques pour la détection de la malaria [76]
2022	Fibre à cristal photonique pour la détection du sérum sanguin et du plasma avec une faible perte de confinement [77]
2023	Fibre à cristaux photoniques pour la détection pétrochimique [78]

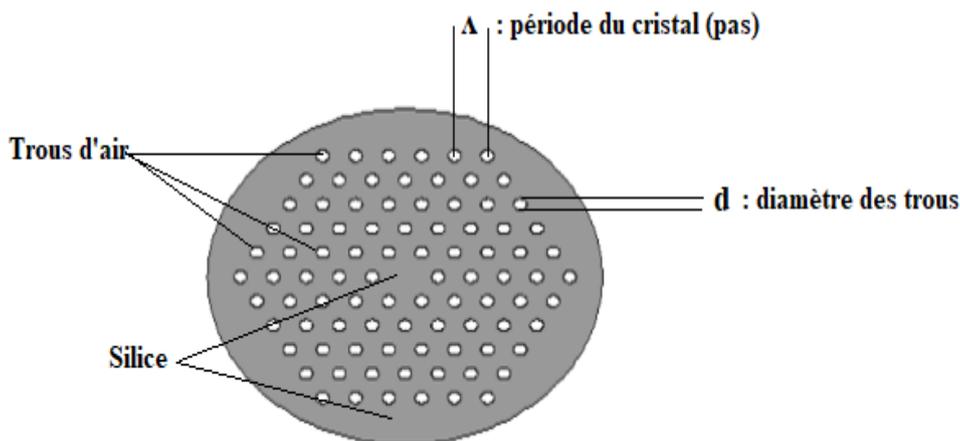


**Figure I.9.** Une multitude de fibres optiques microstructurées [79]

### I.3.2. Notion sur les fibres optiques microstructurées

Étant donné que les champs guidés interagissent avec les inclusions (trous ou capillaires) présentes dans leur structure, les fibres optiques microstructures, également appelées fibres de nouvelle génération, offrent des propriétés optiques meilleures. Leurs propriétés physiques reflètent leur grande liberté de design. La taille, la périodicité, la disposition et la forme des trous peuvent être combinées pour produire une variété de propriétés physiques. Par rapport aux fibres optiques, les fibres à cristaux photoniques offrent une grande souplesse de conception. Généralement, pour des raisons de simplicité, la plupart des fibres à cristaux photoniques sont fabriquées à partir de verre de silice avec  $n = 1.45$ .

La section transversale des fibres microstructurées est composée d'un arrangement de trous (généralement d'air). Il est supposé que cette structure reste inchangée tout au long de l'axe de la fibre. La figure I.10 définit les paramètres qui déterminent les caractéristiques optiques de cet arrangement.



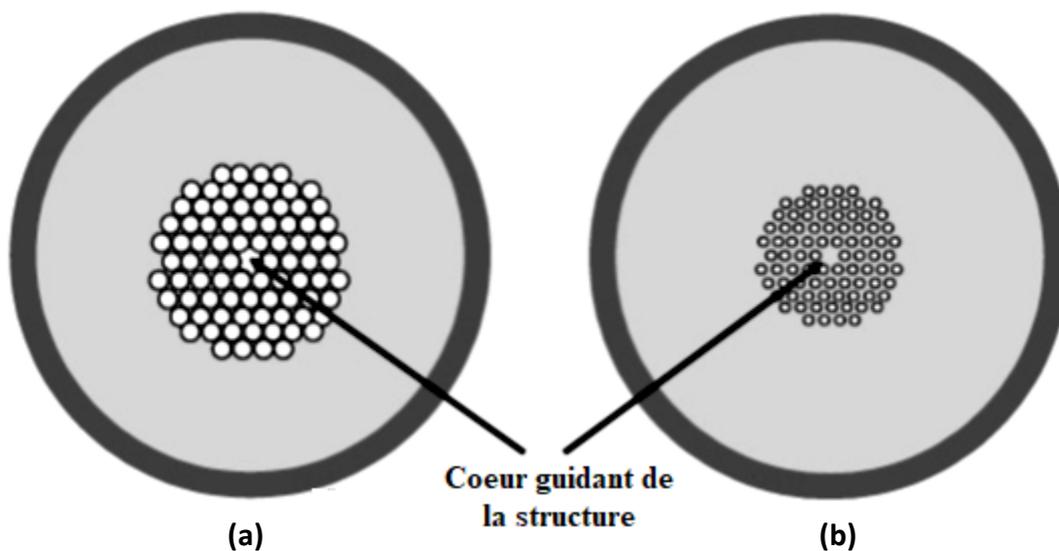
**Figure I.10.** Représentation géométrique d'une fibre microstructurée

L'écartement entre les centres de deux trous consécutives, connu sous le nom de pas ou pitch, et le diamètre du trou  $d$  sont les deux paramètres principaux qui permettent de décrire le rapport  $d/\Lambda$ , le facteur de remplissage, correspondant à la fraction d'air dans la fibre. Le nombre de rangées ou de couronnes de trous utilisées pour former la gaine microstructurée (zone de silice contenant les trous) est un autre facteur important dans la mesure où les pertes de guidage sont réduites. La figure I.10 représente une coupe transversale d'une fibre microstructurée air/silice (FMAS) avec des réseaux triangulaires de trous d'air. Il y a cinq couronnes de trous d'air qui

sont présentées dans la gaine microstructurée. En effet, il est possible de disposer les trous de manière triangulaire, circulaire, hexagonale ou aléatoire. Le centre est considéré comme le cœur optique. Elle est caractérisée par l'absence de trou au milieu de la structure [80].

### I.3.2.1 Principe de guidage

Le guidage de la lumière dans une fibre optique repose sur deux types de fibre microstructurée qui diffèrent selon la nature du cœur le guidage est combiné à la micro-structuration de fibres, plutôt qu'à la différence de composition chimique entre la gaine et le cœur. Les trous réduisent l'indice de réfraction effectif de la gaine [81]. L'indice effectif de la gaine change considérablement en fonction de la longueur d'onde, créant des propriétés spectrales distinctes. Les propriétés de comportement modal, de dispersion chromatique et de non linéarité peuvent être modifiées à la carte en fonction de l'arrangement des trous.



**Figure I.11.** Un exemple de sections transverses des deux familles de fibres microstructurées [82].

(I) une fibre a cœur creux (b) une fibre à cœur plein.

#### a. Fibre optique microstructurée à cœur creux (Fibre à guidage dans des milieux à faible indice de réfraction)

Ces fibres sont généralement appelées « fibres de Bragg » qui sont constituées de couches concentriques avec des indices de réfraction variés, et les fibres « creuses » dans lesquelles la lumière est contenue, guidée dans l'air. Il est constitué d'un noyau creux, illustré sur la figure I.11(a). Dans ce cas, le trou d'air central a un diamètre plus grand que le diamètre du trou

environnant. De ce fait, l'indice de réfraction du cœur devient inférieur par rapport l'indice de réfraction de la gaine et le principe des fibres conventionnelles ne s'applique pas à ces fibres. Cette géométrie entraîne l'apparition d'une bande interdite photonique BIP, analogue à la bande interdite électronique des semi-conducteurs. La taille et la répartition des trous définissent les caractéristiques BIP, qui permettent de déterminer la bande de longueur d'onde et les angles d'incidence pour lesquels la lumière est réfléchi. La propagation dans l'air limite les pertes intrinsèques dues à l'interaction lumière/matière, permettant l'injection de très grandes densités de puissance sans phénomènes de claquage du matériau, même à des longueurs d'ondes où la silice est peu transparente [83]. Ainsi, de telles fibres sont particulièrement intéressantes pour la transmission de puissances optiques importantes [84].

### **b. Fibre optique microstructurée à cœur plein (Fibre à guidage dans des milieux à haut indice de réfraction)**

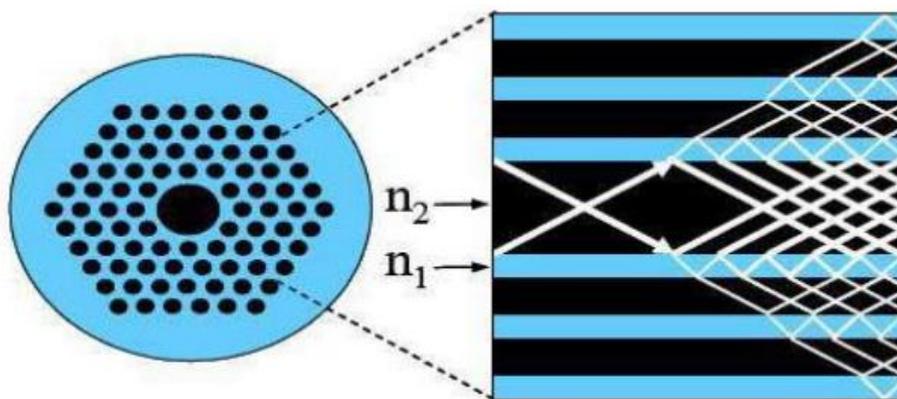
Les fibres « infinies monomodes » et « grandes ouvertures numériques » ont des cœurs « grandes dimensions » et des modes étendus forts. Le cœur de la fibre « forte non linéaire » a une densité de puissance important malgré son petit noyau. Elle se compose d'un cœur solide et d'un réseau de trous entourant ce cœur comme présenté sur la figure I.11(b). L'indice de réfraction effectif de la gaine est inférieur à celui du cœur en raison de la présence de trous. La lumière est dirigée vers le cœur via une réflexion totale interne à l'interface entre le cœur et l'air. Le long de la fibre, la fréquence fondamentale est guidée par le cœur solide de la fibre et les modes d'ordre supérieur fuient dans les trous entourant le cœur. Cette bande interdite est définie par la géométrie de la fibre. La lumière est guidée sur toute la longueur de la fibre, même si l'indice de réfraction du cœur est inférieur à celui de la gaine. Cette propriété contraste fortement avec les fibres conventionnelles qui nécessitent un cœur d'indice de réfraction relativement plus élevé pour que la lumière soit guidée le long de la fibre. Cette propriété unique offre une certaine souplesse dans le choix du matériau de la fibre [85].

### **I.3.2.2 Types de guidage**

#### **I.3.2.2.1 Guidage par Bande Interdite Photonique**

Pour l'optique intégrée, il existe déjà un mécanisme connu et utilisé pour conduire la lumière dans les cristaux photoniques. Le but est de créer une structure où le photon remplira la même fonction que l'électron dans un semi-conducteur. La bande spectrale BIP est telle qu'une onde à cette longueur d'onde ne peut pas se propager dans la structure. La résonance transversale

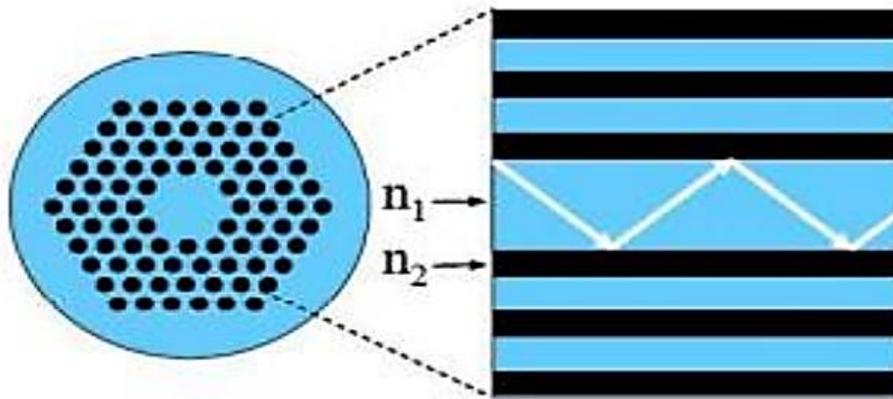
dans la gaine optique de la fibre est l'effet souhaité, qui maintiendrait la lumière dans une zone centrale appelée « cœur » et la confinerait. Le principe de guidage dans une fibres à BIP est présenté sur la figure I.12. La propagation se produirait alors dans la direction axiale, sans changement de direction. Les premières fibres créées sur cette idée ont une gaine optique composée d'une succession de couches transparentes d'indices haut et bas qui ressemblent à un réseau de Bragg à une dimension, d'où leur nom est « fibres de Bragg » [83]. Cette structure laisse place à la formation d'interférences constructives entre les composantes de l'onde lumineuse réfléchies aux interfaces entre les couches. Ces différentes réflexions maintiennent la lumière au centre du réseau de Bragg radial et empêchent sa propagation. Comme le mécanisme de propagation de la lumière ne repose pas sur l'idée courante de réflexion interne totale, Il est possible que l'indice de la zone où la lumière est confinée, appelée « cœur », soit inférieur à celui des couches de la gaine optique qui l'entourent.



**Figure I.12.** Principe de guidage dans les fibres photoniques à BIP [79].

### I.3.2.2.2 Guidage par Réflexion Totale Interne

En cas de détérioration locale de la périodicité des canaux d'air, il y aura un cœur en silice d'indice constant et supérieur à celui de la gaine microstructurée dans la région correspondante. En conséquence, on peut considérer l'indice de la gaine comme un milieu uniforme d'indice effectif équivalent. En se propageant parallèlement à l'axe des canaux d'air, cet indice est équivalent à l'indice effectif du mode fondamental transmis dans un espace illimité similaire à cette gaine. Le principe de guidage dans une fibres à RTI est illustrée sur la figure I.13.



**Figure I.13.** Principe de guidage dans les fibres photoniques à RTI [79].

La fibre microstructurée air/silice (FMAS) peut être approchée par une fibre à saut d'indice équivalente qui fonctionne suivant le principe classique de réflexion totale interne. Il serait utile de rappeler le principe de guidage à l'intérieur de la fibre standard pour bien comprendre comment la lumière peut être confinée dans le cœur de la fibre microstructurée. La raison pour laquelle la lumière pénètre dans le cœur est un indice de réfraction efficace de la gaine de fibre plus faible que celui du cœur. La condition suivante est requise pour assurer la réflexion totale interne dans une fibre conventionnelle [86] :

$$kn_g < \beta < kn_c \quad \text{I.14}$$

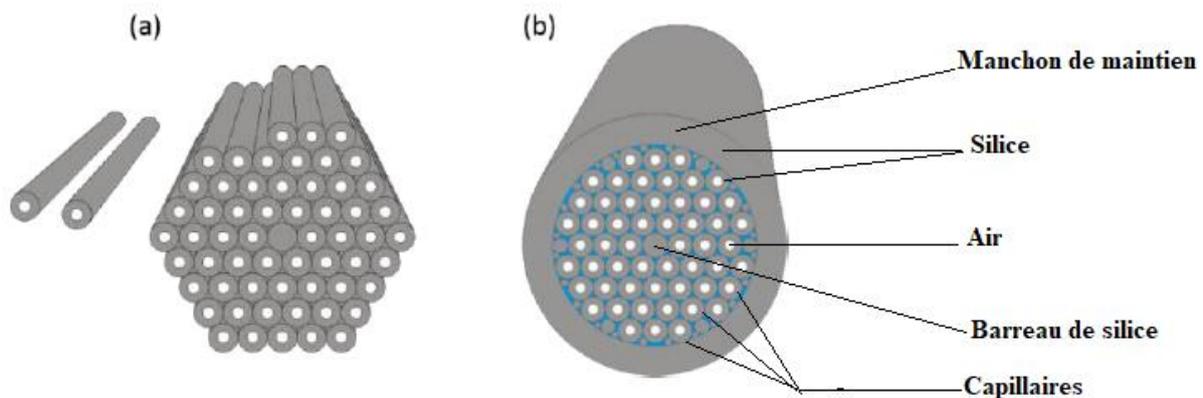
Avec  $n_c$  et  $n_g$  présentent respectivement les indices du cœur et de la gaine,  $\beta$  et  $k$  sont respectivement la constante de propagation  $\beta$  et le vecteur d'onde. Une certaine valeur de cette constante autorisée dans le cœur mais interdite dans la gaine est détenue par l'onde guidée. Cette condition est toujours applicable dans une FMAS. Les modes qui sont guidés par le cœur en silice sont ceux qui ont une constante de propagation  $\beta$  comme :

$$\beta_{\text{gaine silice max}} < \beta < kn_{\text{silice}} \quad \text{I.15}$$

$\beta_{\text{gaine silice max}}$  est la constante de propagation du mode fondamental dans la gaine de la fibre microstructurée de dimensions infinies, en l'absence de site de défaut. Étant donné que l'indice du cœur est plus grand que l'indice effectif de la gaine microstructurée, il est évident que le principe de réflexion totale interne garantit le guidage dans la FMAS.

### I.3.2.3 Technique de fabrication

La fabrication initiale a eu lieu dans les laboratoires de l'Université de Bath en 1996 [51]. La méthode utilisée est connue sous le nom d'assemblage-étirage, qui implique l'étirement à une température élevée d'un ensemble de capillaires et de barreaux de silice. La fibre microstructurée air/silice se distingue de la fibre standard à saut d'indice par l'introduction de trous d'air dans la gaine, ce qui nécessite un processus de fabrication différent. Pour fabriquer ce type de fibre, il existe diverses techniques de fabrication, telles que le perçage, le moulage ou l'extrusion, mais la méthode la plus fréquemment utilisée par la communauté est la technique d'empilement et de tirage (stack and draw en anglais) [87]. Les premières étapes de la fabrication par « stack and draw » est illustrée sur la figure I.14.

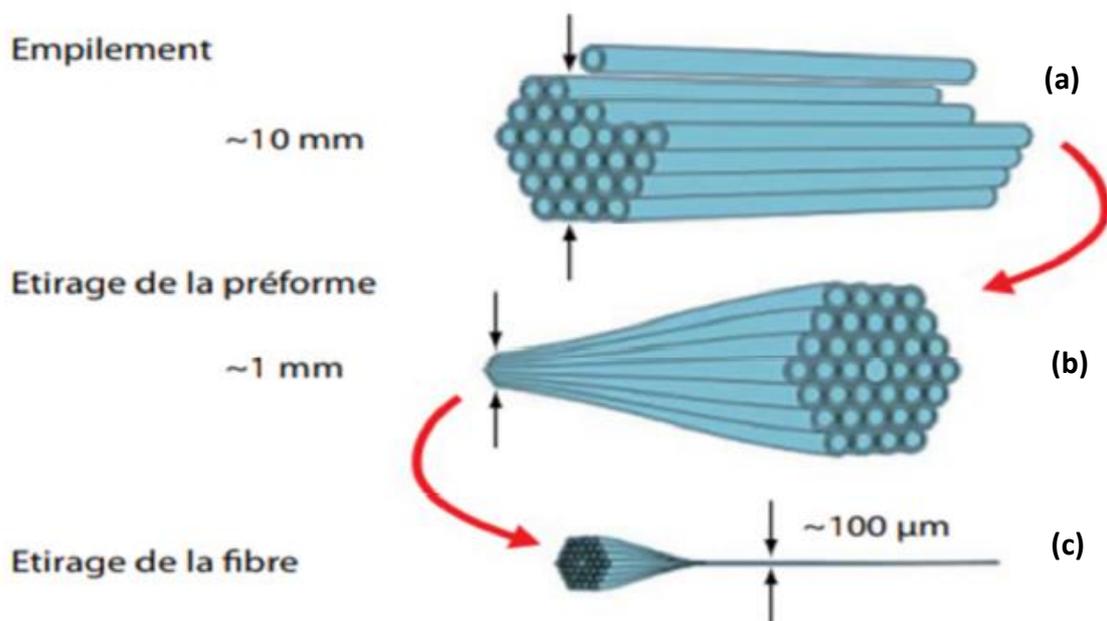


**Figure I.14.** Première étape de la méthode de fabrication "stack and draw" [88]

(a) l'empilement des capillaires (b) le manchonnage (la préforme primaire).

La fabrication "stack and draw" est divisée en deux phases principales. La première étape consiste à créer une préforme en empilant des tubes de silice pleins et creux d'un diamètre d'environ 1 mm, dont l'arrangement est une réplique à grande échelle de la microstructure souhaitée. Le cœur de la fibre est obtenu en utilisant un tube plein au lieu d'un tube creux, ce qui provoque un défaut dans la structure périodique. Dans un second temps, une couche de polymère est ajoutée à la préforme, puis l'ensemble est étiré selon la même méthode que pour les fibres standard. Lors du fibrage, divers paramètres doivent être ajustés pour respecter les spécifications préétablies en termes de diamètre, de vitesse ou de tension de fibrage. La régulation porte sur la vitesse de descente de la préforme dans le four afin de garantir un diamètre de fibre et une vitesse de fibrage spécifiques. Par exemple, pour réduire la tension de fibrage, il sera nécessaire d'augmenter la température du four à une vitesse constante. L'étape

de fibrage est difficile car elle nécessite l'établissement des paramètres (vitesse de descente de la préforme, vitesse de tirage, température, etc.) pour obtenir les caractéristiques de PCF souhaitées. La qualité de la structure de la fibre étirée est fortement influencée par les paramètres de fibrage. Lorsque les températures sont trop élevées, les trous interstitiels et les trous constituant la gaine se rebouchent. En revanche, une température trop faible empêchera les trous interstitiels de se refermer. Il arrive parfois que les trous du centre aient un diamètre plus grand que les trous périphériques. Ceci est dû au gradient thermique du four : la température plus élevée à l'extérieur qu'à l'intérieur de la préforme ramollit les dernières couronnes. La pression régnant dans les capillaires préformés provoque également une déformation des trous. La figure I. 15 présente les différentes étapes de fabrication des PCF.



**Figure I.15.** Présentation schématique des différentes étapes de fabrication des fibres microstructurées [89]

(a) assemblage de capillaires (b) étirage de la préforme (c) fibrage de la canne pour avoir une fibre de dimension micrométrique.

L'avantage de cette méthode de fabrication de fibre est qu'elle permet un contrôle précis des paramètres de la gaine jusqu'à la dernière étape de fabrication. En modifiant la vitesse et la pression lors du tirage de la fibre, il est possible d'obtenir le  $\Lambda$  et le  $d/\Lambda$  désirés. Ainsi, avant de déterminer les paramètres appropriés, il est nécessaire de réaliser plusieurs échantillons. En raison de la grande répétition du processus, les paramètres ne changeront que peu d'un tirage à l'autre.

### I.3.3. Caractéristiques optiques des Fibres optiques microstructurées

L'indice équivalent du milieu microstructuré est déterminé comme l'indice effectif du mode fondamental ( $n_{\text{eff}}$  le plus élevé) qui peut se propager dans ce milieu supposé infini, comme pour un matériau homogène transparent dont l'indice est calculé en fonction de la vitesse de propagation d'une onde plane dans ce milieu ( $n = c/v$ ). Cet indice est connu sous le nom « Fundamental Space Filling Mode » ou  $n_{\text{FSM}}$ . En remplaçant l'indice de réfraction de la gaine optique par l'indice  $n_{\text{FSM}}$ , La propagation peut être représentée en utilisant la loi traditionnelle de Snell-Descartes présentée sur l'équation I.1.

Une fibre à saut d'indice, utilisant l'indice du matériau comme cœur et  $n_{\text{FSM}}$  comme indice de gaine, peut alors être définie comme équivalente à la fibre optique microstructurée FOM en question. On peut décrire les caractéristiques de guidage d'une fibre comme suit :

#### I.3.3.1 Longueur d'onde de coupure et caractère infiniment monomode

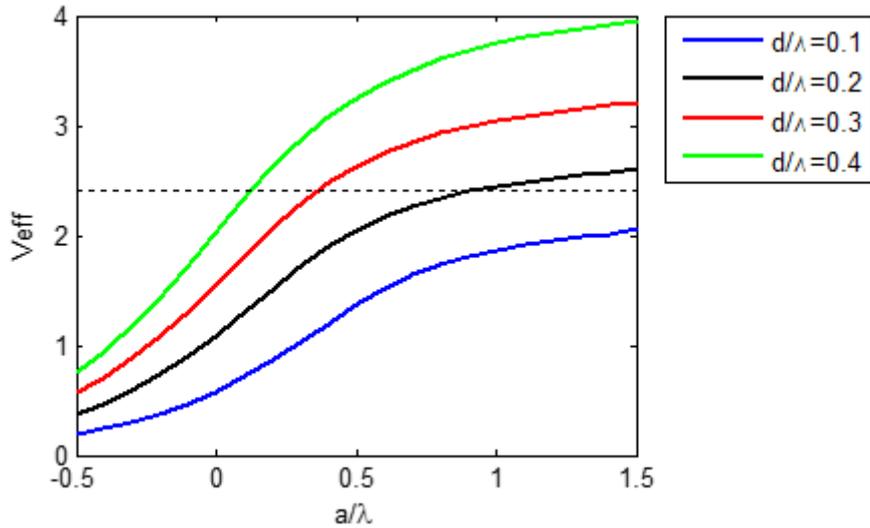
Dans le cas d'une fibre à cristaux photoniques, la fréquence normalisée  $V_{\text{eff}}$  apportée dans le cadre des fibres conventionnelles peut être écrite sous la forme suivante :

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi a_{\text{eq}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{FSM}}^2} \quad \text{I.16}$$

Ou  $n_{\text{cœur}}$  indique l'indice de réfraction du cœur,  $n_{\text{FSM}}$  représente l'indice de réfraction de la gaine (FSM : Fundamental Space filling Mode) et  $a_{\text{eq}}$  est le rayon du cœur qui doit encore être déterminé. Certains chercheurs ont choisi  $a_{\text{eq}} = \Lambda$  [90]. Dans ce cas la fréquence normalisée de coupure de second mode,  $V_{\text{min}}$  dans le cas de fibre à saut d'indice (FSI),  $V_{\text{co}}$  pour les fibres microstructurées, peut être égale à  $\pi$  [91]. La détermination de  $a_{\text{eq}}$  est partiellement arbitraire car l'interface cœur-gaine n'est pas clairement définie, et la valeur choisie modifie les critères de "monomodicité". Donc pour les fibres à cristaux photoniques, pour avoir la valeur de  $V_{\text{co}}$  qui est égale à 2.405, il faut choisir  $a_{\text{eq}} = 0.64\Lambda$  [92]. Cette approche est complètement efficace pour  $d/\Lambda < 0.4$ . Les courbes présentées sur la figure permettent d'identifier le domaine spectral de fonctionnement monomode d'une fibre microstructurée. Donc la valeur  $V_{\text{co}}$  sépare le domaine monomode et multimode et  $V$  ne dépend pas que du rapport  $d/\Lambda$ .

La fréquence normalisée effective  $V_{\text{eff}}$  varie proportionnellement en fonction du rapport  $d/\Lambda$ , selon une analyse numérique. Par conséquent, pour garantir un guidage unimodal et maintenir

$V_{\text{eff}}$  en dessous de 2,405 (fréquence de coupure du mode fondamental pour les fibres standard), il suffit de réaliser des trous de faible diamètre ou un pitch  $\Lambda$  suffisamment grand. Le comportement modal des PCF en fonction de  $a/\lambda$  pour différents rapports de  $d/\Lambda$  est illustré dans la figure I.16. Dans ce cas, la fibre sera monomode quand le rapport  $d/\Lambda = 0.1$ .



**Figure I.16** Comportement modal des fibres microstructurées en fonction de la longueur d'onde normalisée  $a/\lambda$  pour des différents rapports de remplissage  $d/\Lambda$ .

Pour garantir un guidage unimodal, il suffit de créer des trous de faible diamètre ou d'avoir un pitch  $\Lambda$  suffisamment grand pour maintenir  $V_{\text{eff}}$  en dessous de 2,405 (fréquence de coupure du mode fondamental pour les fibres standard).

Lorsque la longueur d'onde est inférieure à celle de coupure ( $\lambda < \lambda_c$ ), le paramètre  $V$  est supérieur à 2,405 et le guide est multimode. Cependant, lorsque la longueur d'onde guidée diminue jusqu'à la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$ , une fibre conventionnelle devient inévitablement multimode, car la différence d'indice cœur/gaine est faiblement influencée par de la longueur d'onde. Ainsi, La fibre perd son caractère monomode lorsque sa longueur d'onde diminue.

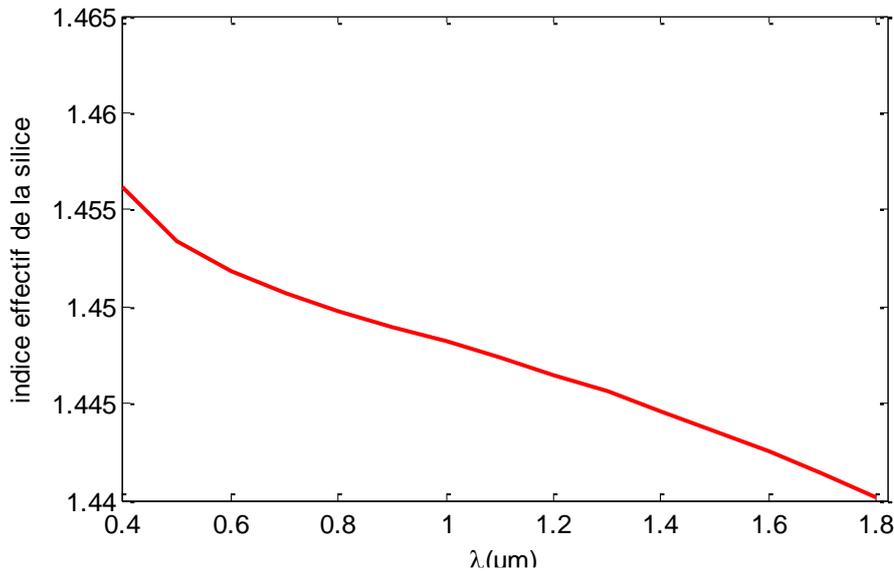
### I.3.3.2 L'indice effectif

La condition physique à vérifier pour que le guidage de la lumière se produise par réflexions totales est que la constante de propagation soit  $\beta$  comprise entre  $kn_{\text{silice}}$  et  $\beta_{\text{FMS}}$ .

$$\beta_{\text{FMS}} < \beta < kn_{\text{silice}}$$

I.17

Ou  $Kn_{\text{silice}}$  est la constante de propagation la plus élevée pour un mode dans la région du cœur composée de silice.  $\beta_{\text{FMS}}$  est la constante de propagation la plus faible pour un mode de gaine de fibre. Ce mode est similaire au mode fondamental qui se diffuserait dans un milieu hétérogène (composé de silice et de canaux) équivalent à la gaine d'extension. La figure I.17 montre la dépendance de l'indice effectif avec la longueur d'onde  $\lambda$ .



**Figure I.17** Variation de l'indice effectif de la silice en fonction de la longueur d'onde

### I.3.3.3 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique définit la capacité de transmission d'un système de communication optique. En raison de l'allongement du temps, le débit de transmission est limité. Elle est calculée à base des indices effectifs d'une bande spectrale et exposée par la relation suivante.

$$D_c = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad \text{I.18}$$

Avec  $D_c$  est La dispersion chromatique,  $n_{\text{eff}}$  est l'indice effectif du mode guidé,  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide,  $\lambda$  est la longueur d'onde.

L'étalement spectral du mode fondamental est directement lié à la dispersion du guide. Pour cela, et en modifiant la conception de la fibre, il est possible de prévoir de nouveaux profils de courbes de dispersion. (Les paramètres opto-géométriques).

L'expression de la dispersion indique une dispersion positive du guide d'onde si la distribution du champ reste restreinte dans le cœur et ne change pas spectralement. En raison de la différence d'indice très élevée entre le champ et le milieu extérieur, le champ est fortement confiné dans la zone guidante (bien plus qu'entre le cœur et la gaine d'une fibre conventionnelle). Le champ est confiné de sorte que les variations spectrales sont extrêmement faibles. La dispersion du guide devient positive, ce qui réduit les longueurs d'onde d'annulation de la dispersion chromatique [93, 94]. Dans la génération de continuum, où une dispersion positive à la longueur de pompe est nécessaire, le décalage vers les basses longueurs d'onde du zéro de dispersion est utilisé (par exemple égale à 1064 nm) [95]. Contrairement, lorsque la taille du cœur est grande et/ou la proportion d'air dans la gaine microstructurée est faible, le champ du mode fondamental s'étale plus longtemps, ce qui remet la contribution du guide négative.

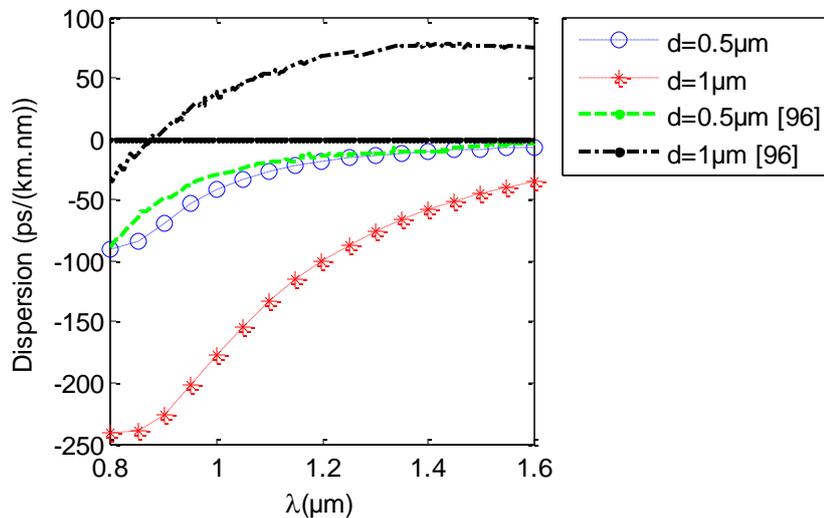
On peut également ajuster l'allure de la courbe de dispersion en jouant sur les paramètres géométriques des fibres microstructurées pour avoir une dispersion plate et quasi-nulle sur une large bande spectrale, ce qui est nécessaire pour de nombreuses applications. Parmi ces applications on peut citer :

- La dispersion des solitons : une pente non nulle peut provoquer de fortes instabilités, altérant les caractéristiques de transmission des solitons [96].
- La génération de super continuum sur une large bande est contribué par une dispersion faible, positive et sans pente [97].
- multiplexage en longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexing) : La dispersion des fibres des lignes de transmission doit être plate dans le but que les impulsions dont les longueurs d'onde centrales sont différentes puissent se circuler en subissant le même allongement temporel [98].

Afin d'avoir une dispersion chromatique plate à une longueur d'onde spécifique, il est nécessaire d'adapter la dispersion du guide de manière à ce que sa pente soit inverse à celle de la dispersion du matériau. La courbe de dispersion du guide se déplace spectralement lorsque le rapport  $d/\Lambda$  est modifié, mais la valeur de sa pente ne change pas considérablement. Ainsi, la courbe de dispersion du guide est ajustée en utilisant  $\Lambda$  pour obtenir une pente opposée à celle du matériau, puis la courbe de dispersion du guide est déplacée vers la longueur d'onde pour laquelle on souhaite obtenir une dispersion plate en modifiant  $d/\Lambda$ . Pour analyser la variation de la dispersion et le décalage du zéro de dispersion en changeant les paramètres opto-

géométriques ( $\Lambda$  et  $d$ ), la figure I.18 présente la variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde quand :  $\Lambda=2\mu\text{m}$  pour différents diamètres  $d=0.5\mu\text{m}$  et  $d=1\mu\text{m}$ .

Nous remarquons depuis la figure I.18 que le zéro de dispersion peut être situé entre  $0.8\mu\text{m}$  et  $1\mu\text{m}$  pour  $d=0.5\mu\text{m}$ . Tandis que pour  $d=1\mu\text{m}$ , le zéro de dispersion de la PCF est décalé vers les grandes longueurs d'onde pour l'étude faite par Rim et al [99] par la méthode des éléments finis. En changeant la méthode de simulation en BeamProp Method (BPM), on a eu une dispersion négative tout au long de la marge de longueurs d'onde de  $0.8\mu\text{m}$  à  $1.6\mu\text{m}$  pour les deux diamètres. Donc la modification des caractéristiques  $d$  ainsi la méthode de modélisation permet d'obtenir de nouvelles propriétés des dispersions et de non-linéarités.

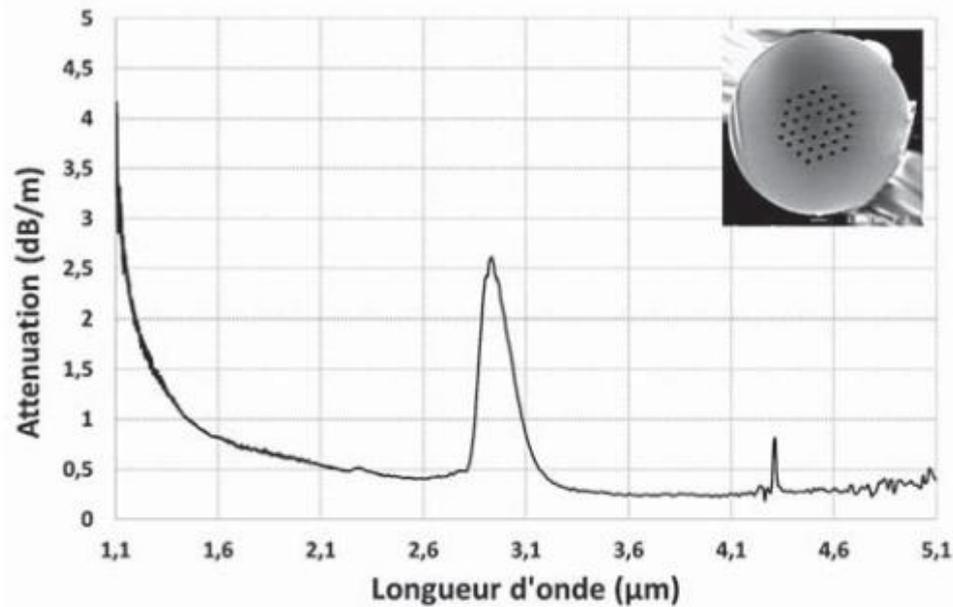


**Figure I.18** Variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour une fibre microstructurée avec  $\Lambda = 2\mu\text{m}$  pour :  $d=0.5\mu\text{m}$  et  $1\mu\text{m}$ .

### I.3.3.4 Les pertes (L'atténuation)

Les fibres optiques, comme tout support de transmission, apportent des distorsions aux signaux qu'elles transportent affaiblissant ainsi le signal lumineux pendant sa propagation. Les pertes optiques sont le nom donné à cet affaiblissement de la lumière porteuse d'informations au cours de sa progression dans la fibre.

L'atténuation totale d'une fibre optique comprend divers types de pertes. Cette atténuation résulte des interactions entre la lumière et son milieu de propagation. Comme le montre la figure I.19, l'atténuation d'une fibre microstructurée en verre est idéal pour les transmissions optiques car elle ne perd pas beaucoup de longueurs d'onde [100].



**Figure I.19** Courbe d'atténuation d'une fibre microstructurée en verre de composition AsSe [100]

En fonction du type de matériau qui compose le milieu et de la longueur  $L$  de la fibre, elle est exprimée en décibel par unité de longueur (dB/km) et donnée par l'expression suivante [101] :

$$\alpha \left( \frac{\text{dB}}{\text{Km}} \right) = - \frac{10}{L} \log \left[ \frac{P_s}{P_e} \right] \quad \text{I.19}$$

$P_s$  et  $P_e$  représentent les puissances optiques à la sortie et à l'entrée de la fibre, ainsi que  $L$  est la longueur de la fibre.

La diffusion et l'absorption sont deux phénomènes bien connus qui contribuent principalement aux pertes optiques qui peuvent également être divisées en deux parties distinctes : les pertes intrinsèques et extrinsèques qui sont les deux origines de l'atténuation. Les pertes intrinsèques sont causées par le matériau lui-même et ne peuvent être corrigées qu'en modifiant le matériau. Par exemple, il s'agit de diffuser Rayleigh [102] et l'absorption du matériau par les transitions électroniques et les vibrations moléculaires sont des exemples. En ce qui concerne les pertes extrinsèques, elles sont générées par le processus de fabrication et peuvent donc être améliorées théoriquement. Les pertes par courbure comprennent les pertes dues aux micro-courbures et aux macro-courbures, de même que les pertes causées par les imperfections et les impuretés aux interfaces cœur/gaine.

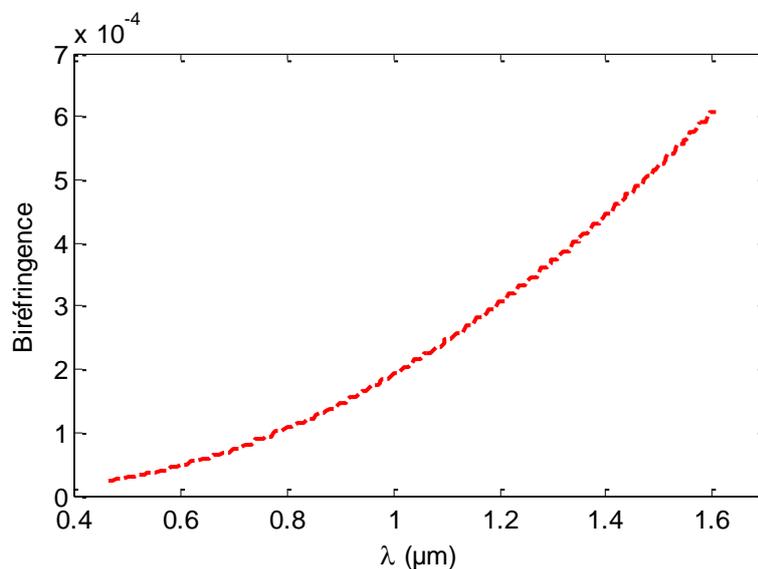
### I.3.3.5 Birefringence

Les PCF devraient être nulles car elles sont considérées comme isotropes. Cependant, La biréfringence peut être présente dans la plupart des fibres réelles, même si leur structure semble régulière. L'anisotropie de ces fibres peut être causée par deux causes intrinsèques : la première repose dans la rupture volontaire ou non de la symétrie de la fibre, et la seconde réside dans l'existence éventuelle de contraintes anisotropes dans le matériau constitutif de la fibre, ce qui donne à l'indice de réfraction un caractère tensoriel.

La différence entre les indices effectifs des deux polarisations orthogonales d'une onde optique est appelée biréfringence. La relation suivante peut l'exprimer comme suit [103] :

$$\mathbf{B} = |\operatorname{Re}(\mathbf{n}_{\text{eff}}^x - \mathbf{n}_{\text{eff}}^y)| \quad \text{I.20}$$

Avec :  $n_{\text{eff}}^x$  et  $n_{\text{eff}}^y$  sont les indices des deux états de polarisation qui correspondent respectivement aux deux directions orthogonales de la fibre x et y. Re présente la partie réelle de la différence des indices effectifs.



**Figure I.20** Variation de la biréfringence en fonction de la longueur d'onde

Les défauts de géométrie et les impuretés du matériau provoquent une biréfringence résiduelle de  $10^{-6}$  dans les fibres standard en silice. Dans une PCF dont la géométrie varie tout au long, les trous ne sont pas complètement circulaires, ce qui peut entraîner une biréfringence résiduelle de  $10^{-4}$ . La combinaison des imperfections liées à chaque trou est responsable de la

biréfringence géométrique, qui est principalement la différence entre leur position et/ou leur taille réelle et idéale, ou une déformation potentielle de leur forme. Ces imperfections sont très difficiles à détecter et difficiles à mesurer.

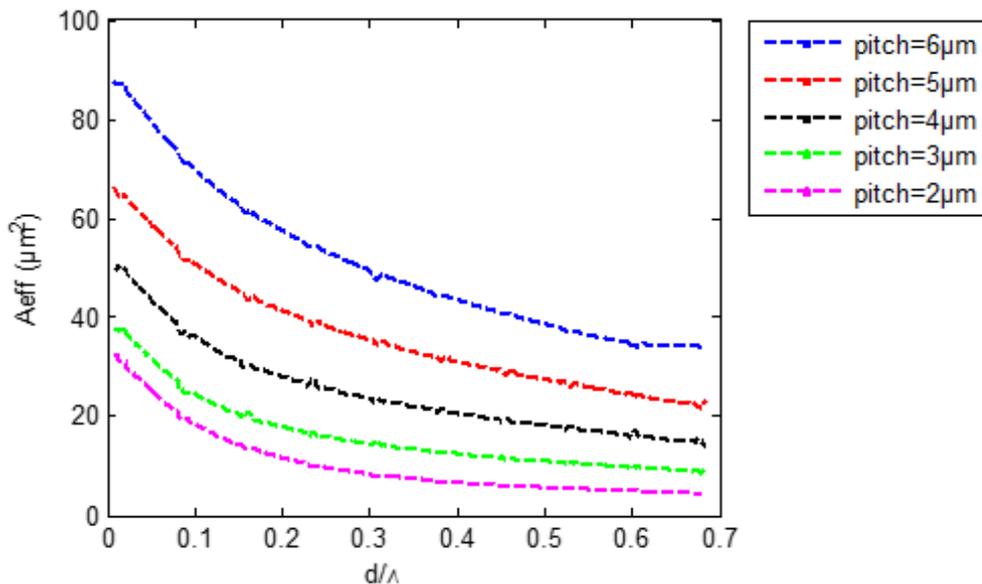
### I.3.3.6 L'aire effective

L'autre paramètre optique qui peut être modifié dans une PCF est le diamètre du cœur et donc l'aire effective des modes propagatifs, ou la dimension de leur distribution spatiale.

Les diamètres du cœur des fibres standards varient de 6  $\mu\text{m}$  à 85  $\mu\text{m}$ , selon qu'elles soient monomode ou multimode. Dans le cas des PCF, Cette mesure peut être inférieure à 1,5 $\mu\text{m}$  et Le champ est plus confiné que la fibre standard et l'aire effective est corrélativement plus faible, ce qui rend les effets non linéaires plus importants.

La répartition transversale du module du champ électrique  $E(x,y)$  est utilisée pour calculer l'aire effective  $A_{\text{eff}}$  [104] :

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_{-\infty}^{+\infty} |\vec{E}(x,y)| dx dy \right)^2}{\iint_{-\infty}^{+\infty} |\vec{E}(x,y)|^4 dx dy} \quad \text{I.21}$$



**Figure I.21** Aire effective calculée à la longueur d'onde 1.55 $\mu\text{m}$  pour des différents rapports  $d/\Lambda$

Prenons l'exemple de Rim et al [99], le  $A_{\text{eff}}$  est exploité en appliquant la méthode des éléments finis à la longueur d'onde  $1.55\mu\text{m}$ . La figure I.21 présente la variation de l'aire effective en fonction de la longueur d'onde pour des différents paramètres de PCF.

À mesure que les diamètres des trous d'air augmentent, nous constatons que le mode devient plus limité. L'aire effective du mode fondamental est généralement proportionnelle à  $\Lambda^2$  avec un facteur qui dépend préalablement du rapport  $d/\Lambda$  [105].

### I.3.4. Avantage des fibres optiques microstructurées

- Large plage de transmission : En comparaison avec les fibres optiques traditionnelles, elles permettent la transmission de la lumière sur une plage de longueurs d'onde plus large.
- Flexibilité de la conception : Ils sont flexibles et peuvent être ajustés pour répondre aux besoins des applications telles que la transmission de données à haut débit, les capteurs...
- Fonctionnement monomode pour une longueur d'onde très courte.
- Grande aire effective : Les fibres microstructurées sont utiles pour les applications à large bande et les lasers à fibre car elles ont une grande aire effective et peuvent supporter un large éventail de modes de propagation de la lumière.
- Forte non-linéarité : Les fibres microstructurées sont utiles pour les applications de traitement de signal optique telles que la génération de fréquences harmoniques et la conversion de longueur d'onde en raison de leur forte non-linéarité. En raison de leur faible dispersion, elles peuvent être transmises à longue distance avec une faible atténuation et une faible distorsion.
- Dispersion contrôlable : Résistance à la déformation
- Haute biréfringence.
- Les fibres microstructurées sont plus résistantes à la courbure que les fibres optiques traditionnelles, ce qui facilite l'installation et les applications.
- Résistance à la courbure : Les fibres microstructurées sont plus résistantes à la courbure que les fibres optiques traditionnelles, ce qui facilite l'installation et les applications.

### I.3.5. Applications des fibres optiques à base des cristaux photoniques

Les FMAS sont déjà entrées dans le domaine des applications industrielles grâce à la maturité de leurs technologies de fabrication. Ce sont de nombreuses applications qui s'étendent au-delà du domaine limité des télécommunications optiques. Les fibres microstructurées monomodes

peuvent avoir des cœurs de dimensions plus importantes que les fibres conventionnelles. En revanche, des fibres avec une taille de cœur supérieure à cinquante fois la longueur d'onde peuvent être créées facilement en utilisant des structures photoniques [100]. De telles fibres sont particulièrement intéressantes pour la transmission de fortes puissances optiques (télécommunications [106], lasers de puissance pour la découpe ou le marquage [107]), ou pour les lasers ou amplificateurs à fibres dopées [84].

La conception, la fabrication et l'application de PCF spécialisés avec d'autres avantages des fibres optiques spéciales dotées de propriétés inaccessibles et exotiques bien que les capacités des fibres optiques standards ont récemment suscité un grand intérêt. Les applications de ces dernières sont limitées dans des domaines plus prestigieux tels que la transmission d'information en télécommunication, le diagnostic de problèmes de santé tels que le traitement de certaines maladies en médecine, ainsi que l'utilisation des fibres optiques dans le concept d'éclairage en muséographie et l'architecture et l'aménagement d'espaces d'agrément public et domestique.

Alors que de nombreuses applications de fibres à cœurs creux sont relativement nouvelles, les applications de fibres à cœur plein sont plus matures. De nouvelles propriétés telles que la possibilité d'utiliser des fibres à codage unique sans fin, à grande surface modale et hautement non linéaires font partie de ces conceptions. La construction de gaines secondaires avec des trous d'air au lieu des polymères conventionnels à faible indice donne aux PCF un avantage significatif en termes de gestion de la puissance pour les fibres actives à double gaine.

De plus, les PCF ont émergé dans d'autres domaines grâce à leurs propriétés de fabrication presque parfaites, ayant un impact significatif dans le développement.

On peut distinguer parmi ces applications :

### **I.3.3.1 Lasers à fibres**

Les fibres à cristaux photoniques conviennent aux systèmes laser puissant car ils peuvent supporter des puissances optiques élevées sans subir de dommages. En raison de leur large bande passante et de leur guidage de lumière amélioré, ils sont utilisés dans les applications industrielles d'usinage laser, de découpe laser et de traitement des matériaux [84].

### **I.3.3.2 Génération de super-continuum**

Les fibres à cristal photonique sont largement utilisées pour la génération de super-continuum, où un laser à bande étroite est lancé dans les PCF pour produire un spectre de lumière intense et à large bande. Les applications de super continuum incluent la spectroscopie, la tomographie par cohérence optique (OCT) et les télécommunications [108].

### **I.3.3.3 L'optique non linéaire**

Grâce aux propriétés uniques de leur guide d'ondes, les fibres à cristal photonique permettent des interactions non linéaires efficaces. Les applications telles que la conversion de fréquence, l'amplification paramétrique et l'oscillation paramétrique optique comprennent leur utilisation [109].

### **I.3.3.4 L'optique quantique**

Les expériences d'optique quantique et de traitement quantique de l'information utilisent des PCF. La conversion paramétrique spontanée, la manipulation d'états quantiques et les protocoles de communication quantique peuvent les utiliser pour générer des paires de photons [110].

### **I.3.3.5 Des amplificateurs à fortes puissances**

Un amplificateur de puissance basé sur les fibres à cristaux photoniques (PCF) est un type d'amplificateur optique qui utilise les propriétés uniques des PCF pour amplifier les signaux optiques. Un amplificateur d'appoint est un étage d'amplification qui fournit plus de puissance d'amplification pour compenser la perte de signal dans un système de transmission optique à longue distance. En général, un amplificateur basé sur la PCF offre des capacités de gestion de la dispersion, une plus grande couverture de bande passante et des performances d'amplification améliorées. Ces fonctionnalités le rendent idéal pour les systèmes de transmission optique longue distance, les réseaux WDM denses et d'autres contextes où la préservation de la qualité et l'amplification du signal sont cruciales [111].

### **I.3.3.6 Tomographie**

Les techniques d'imagerie biomédicale telles que l'endoscopie, la microscopie confocale et la microscopie multi photonique utilisent des fibres microstructurées. Les PCF sont utiles pour la

recherche biomédicale et le diagnostic en raison de leurs propriétés uniques, telles que leur guidage flexible de la lumière et leur haute résolution spatiale [112].

### **I.3.3.7 Communications optiques**

Les PCF peuvent être conçus pour répondre aux exigences particulières des systèmes de communication optique. Ils offrent des avantages tels qu'une faible perte, une grande largeur de bande et une ingénierie de dispersion, qui sont bénéfiques pour la transmission longue distance, la communication de données à grande vitesse et les systèmes de multiplexage par répartition en longueur d'onde (WDM) [113].

### **I.3.3.8 Capteurs**

Les capteurs à fibres optiques microstructurées sont idéaux pour la surveillance des paramètres environnementaux en raison de leurs nombreux avantages par rapport aux capteurs conventionnels. La légèreté, la petite taille, la sensibilité, l'immunité aux interférences électromagnétiques, le potentiel de multiplexage et la capacité de mesure sans contact sont quelques-uns des avantages. Les avantages leur permettent de mesurer un large éventail de facteurs et de dimensions tels que les déplacements [114], les vibrations [115], la température [116], la pression [117], l'humidité [118], les ondes acoustiques [119] et les dimensions biochimiques [120]. Ils peuvent modifier les propriétés de guidage du PCF en modifiant les caractéristiques des éléments introduits (par exemple, en modifiant l'indice effectif des modes en réponse à une variation de la température) [121].

## **I.4. Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre d'abord les fibres optiques conventionnelles ensuite les fibres microstructurées et leurs différentes propriétés. Nous avons débuté par une générale description de la structure de la fibre optique ainsi que le principe de guidage, le mode de propagation et les différents types des fibres tel que les fibres monomodes et les fibres multimodes. Nous avons décrit qu'est-ce qu'une les fibres microstructurée. Ensuite, nous avons présenté les deux classes des fibres à cristaux photoniques telles que la fibre microstructurées à cœur creux et les fibres microstructurées à cœur plein. Nous avons défini le principe de guides des PCFs, la méthode de fabrication, les différentes caractéristiques comme la dispersion chromatique, la biréfringence, l'aire effective... en soulignant leurs avantages par rapport aux fibres optiques traditionnelles.

## **Chapitre I : Généralités sur les fibres optiques**

---

Les PCF subissent une étude approfondie. Aujourd'hui, elles permettent de concevoir une amélioration significative des composants existants, comme ceux exploités pour le transport de données jusqu'à l'abonné. De plus, elles sont des candidats sérieux pour le développement de sources de lumière blanche fibrée pour les applications médicales ou de sources de puissance pour l'industrie.

Ces fibres sont également attrayantes car elles peuvent être insérées dans les canaux d'air, d'un gaz, d'un liquide ou même d'une particule, ce qui les rend un emplacement idéal pour les interactions fortes entre onde propagée et liquide/gaz à exploiter. Il est alors envisageable d'éprouver des capteurs optiques de haute sensibilité, ce qui suit est revu en détail.

### Références

- [1] G. Keiser, "Optical fiber communications", McGraw-Hill New York, 2000.
- [2] J. M. Senior M. Y. Jamro, "Optical fiber communications: principles and practice", Pearson Education, 2009.
- [3] S. Singla P. J. I. J. E. E. Singal, "Photonic crystal fiber: construction, properties, developments and applications", 9, 1-8, 2017.
- [4] D. Berkane, "Etude de la propagation optique dans une structure de fibre optique en présence de microdéformations périodiques", Batna, Université El Hadj Lakhder. Faculté des Sciences de l'Ingenieur, 2006.
- [5] O. Slimi, "Microlentillage d'une fibre optique", Thèse de doctorat, 2018.
- [6] J. Bures, "Guided optics: Optical fibers and all-fiber components", John Wiley & Sons, 2009.
- [7] W. Blanc, "Les fibres optiques de verre", 2015.
- [8] A. Danange, J.-M. Cariou, J. Dugas L. Martin, "Caracterisation De L'Ouverture Angulaire Des Fibres Optiques A Saut D'Indice", Optical Fibers in the Biomedical Field, SPIE, 1984.
- [9] E. Conway, "Optical Fiber Communications Principles and Practice", Scientific e-Resources, 2019.
- [10] P. Sharma, R. K. Arora, S. Pardeshi M. Singh, "Fibre optic communications: an overview", J International Journal of Emerging Technology Advanced Engineering, 3, 474-479, 2013.
- [11] A.-S. Bonnet, "Analyse mathématique de la propagation de modes guidés dans les fibres optiques", Thèse de doctorat, Paris 6, 1988.
- [12] R. Ryf, S. Randel, A. H. Gnauck, C. Bolle, A. Sierra, S. Mumtaz, M. Esmaelpour, E. C. Burrows, R.-J. Essiambre P. J. Winzer, "Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent  $6 \times 6$  MIMO processing", J Journal of lightwave technology, 30, 521-531, 2012.
- [13] A. BOUCHELAGHEM, "Modélisation de l'influence des paramètres physiques et géométriques dans des structures magnéto-optique pour les applications en télécommunications", Thèse de doctorat, Université de M'sila, 2017.
- [14] G. P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics: its history and recent progress", J JOSA B, 28, A1-A10, 2011.

- [15] C. K. Kao, "Optical fiber systems: technology, design, and applications", McGraw-Hill New York, 1982.
- [16] P.-a. Belanger, "Optical fiber Theory: A supplement to applied Electromagnetism", World Scientific Publishing Company, 1993.
- [17] Y. Barbarin, V. Kemlin, D. Dolfi, U. Bortolozzo, S. Residori, L. Fulop, M. Bardet, G. Lefrère, G. Le Blanc, J. Luc, "Vélocimétrie hétérodyne multimode à 1550 nm interférant dans une cellule holographique adaptative", OPTIQUE Dijon 2021-Optique guidée, 2021.
- [18] P. Dupont, "Mesures sur fibres optiques", J Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle, 2004.
- [19] V. Yugay, A. Mekhtiyev, P. S. Madi, A. Alkina, E. Neshina, "The use of optical fiber for the creation of security systems for electrical cables of distribution networks of 0.4 kV", Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2021.
- [20] G. Zhang, W. Li, L. Qi, J. Liu, Z. Song, J. Wang, "Design of wideband GHz electric field sensor integrated with optical fiber transmission link for electromagnetic pulse signal measurement", J Sensors, 18, 3167, 2018.
- [21] H. Ohno, H. Naruse, M. Kihara, A. Shimada, "Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor", J Optical Fiber Technology, 7, 45-64, 2001.
- [22] N. J. Frigo, P. P. Iannone, K. C. Reichmann, "A view of fiber to the home economics", J IEEE communications Magazine, 42, S16-S23, 2004.
- [23] H. Struben, "Télématique et planification urbaine", Les Annales de la Recherche Urbaine, Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, 1987.
- [24] C. V. Boys, "Nouvelles brèves", J Courrier, 97, 1983.
- [25] W. Blanc, "Le développement des fibres optiques de silice", J Matériaux Techniques, 101, N23, 2013.
- [26] P. Gillon, O. N'Diaye, P. Caro, "La diffusion des NTIC au sein du réseau urbain français et le rôle des acteurs publics", J NETCOM: Réseaux, communication et territoires/Networks Communications Studies, 15, 231-256, 2001.
- [27] J. Knight, T. Birks, P. S. J. Russell, D. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding", J Optics letters, 21, 1547-1549, 1996.
- [28] A. Coelho, M. Costa, A. Ferreira, M. Da Silva, M. Lyra, A. Sombra, "Realization of all-optical logic gates in a triangular triple-core photonic crystal fiber", J Journal of lightwave technology, 31, 731-739, 2012.

- [29] W. Tian, H. Zhang, X. Zhang, L. Xi, W. Zhang, X. Tang, "A circular photonic crystal fiber supporting 26 OAM modes", *J Optical Fiber Technology*, 30, 184-189, 2016.
- [30] M. B. Hossain, A. A.-M. Bulbul, M. A. Mukit, E. Podder, "Analysis of optical properties for square, circular and hexagonal photonic crystal fiber", *J Optics Photonics Journal*, 7, 235-243, 2017.
- [31] A. N. Z. Rashed, M. S. F. Tabbour, P. Vijayakumari, "Numerical analysis of optical properties using octagonal shaped photonic crystal fiber", *J Journal of Optical Communications*, 43, 549-553, 2022.
- [32] C. Markos, J. C. Travers, A. Abdolvand, B. J. Eggleton, O. Bang, "Hybrid photonic-crystal fiber", *J Reviews of modern physics*, 89, 045003, 2017.
- [33] S. Sen, M. Abdullah-Al-Shafi, A. S. Sikder, M. S. Hossain, M. M. Azad, "Zeonex based decagonal photonic crystal fiber (D-PCF) in the terahertz (THz) band for chemical sensing applications", *J Sensing Bio-Sensing Research*, 31, 100393, 2021.
- [34] A. K. Sharma, V. Popescu, "Magnetic field sensor with truncated honeycomb photonic crystal fiber: analysis under the variations in magnetic fluid composition and temperature for high performance in near infrared", *J Optical Quantum Electronics*, 53, 1-14, 2021.
- [35] V. R. K. Kumar, A. George, J. Knight, P. S. J. Russell, "Tellurite photonic crystal fiber", *J Optics Express*, 11, 2641-2645, 2003.
- [36] M. Goto, A. Quema, H. Takahashi, S. Ono, N. Sarukura, "Teflon photonic crystal fiber as terahertz waveguide", *J Japanese Journal of Applied Physics*, 43, L317, 2004.
- [37] B. Tang, C. Wu, T. Lin, S. Zhang, "Heat-resistant PMMA photonic crystal films with bright structural color", *J Dyes Pigments*, 99, 1022-1028, 2013.
- [38] V. S. Chaudhary, D. Kumar, "TOPAS based porous core photonic crystal fiber for terahertz chemical sensor", *J Optik*, 223, 165562, 2020.
- [39] G. Hasanuzzaman, M. S. Habib, S. A. Razzak, M. A. Hossain, Y. Namihira, "Low loss single-mode porous-core kagome photonic crystal fiber for THz wave guidance", *J Journal of lightwave technology*, 33, 4027-4031, 2015.
- [40] M. R. Islam, M. A. Jamil, M. S.-U. Zaman, S. A. H. Ahsan, M. K. Pulak, F. Mehjabin, M. M. I. Khan, J. A. Chowdhury, M. Islam, "Design and analysis of birefringent SPR based PCF biosensor with ultra-high sensitivity and low loss", *J Optik*, 221, 165311, 2020.

- [41] M. D. Nielsen, M. H. Sørensen, A. Liem, M. Kozak, P. M. Skovgaard, "High-power PCF-based pump combiners", *Fiber Lasers IV: Technology, Systems, and Applications*, SPIE, 2007.
- [42] R. Amin, L. F. Abdulrazak, E. Khan, K. Ahmed, F. M. Bui, F. A. Al-Zahrani, "Inspection of an HSH-PCF for optical Communication with high Non-linearity, birefringence and negative dispersion", *J Alexandria Engineering Journal*, 61, 11139-11147, 2022.
- [43] H. Fu, M. Zhu, C. Liu, Z. Yi, J. Lv, L. Yang, F. Wang, Q. Liu, W. Su, X. Li, "Photonic crystal fiber supporting 394 orbital angular momentum modes with flat dispersion, low nonlinear coefficient, and high mode quality", *J Optical Engineering*, 61, 026111-026111, 2022.
- [44] G. An, S. Li, X. Yan, Z. Yuan, X. Zhang, "High-birefringence photonic crystal fiber polarization filter based on surface plasmon resonance", *J Applied Optics*, 55, 1262-1266, 2016.
- [45] M. S. Islam, M. Faisal, S. A. Razzak, "Extremely low loss porous-core photonic crystal fiber with ultra-flat dispersion in terahertz regime", *J JOSA B*, 34, 1747-1754, 2017.
- [46] E. Wang, P. Cheng, W. Zhao, J. Li, Q. Han, X. Zhou, "Photonic crystal fibers with high birefringence and multiple zero dispersion wavelengths", *J Optical Fiber Technology*, 58, 102309, 2020.
- [47] B. Debord, M. Alharbi, T. Bradley, C. Fourcade-Dutin, Y. Wang, L. Vincetti, F. Gérôme, F. Benabid, "Hypocycloid-shaped hollow-core photonic crystal fiber Part I: Arc curvature effect on confinement loss", *J Optics Express*, 21, 28597-28608, 2013.
- [48] P. Mégret, S. Bette, C. Crunelle, C. Caucheteur, "Fiber Bragg Gratings: fundamentals and applications", *J Univ. de Mons, Electromagnetism, Telecom Department*, 2007.
- [49] R. Buczynski, "Photonic crystal fibers", *J Acta Physica Polonica A*, 106, 141-167, 2004.
- [50] M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg, N. A. Mortensen, "Single-mode photonic crystal fiber with an effective area of 600 square-micron and low bending loss", *J arXiv preprint physics/0311065*, 2003.
- [51] T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber", *J Optics letters*, 22, 961-963, 1997.
- [52] D. D. Diba, "PHOTONIC BANDGAP FIBERS", UMEA university, 2010.
- [53] J. Ju, W. Jin, M. Demokan, "Properties of a highly birefringent photonic crystal fiber", *J IEEE photonics technology letters*, 15, 1375-1377, 2003.

- [54] J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber", *J Reviews of modern physics*, 78, 1135, 2006.
- [55] F. Berghmans, T. Geernaert, T. Baghdasaryan, H. J. L. Thienpont, "Challenges in the fabrication of fibre Bragg gratings in silica and polymer microstructured optical fibres", *J Laser & Photonics Reviews*, 8, 27-52, 2014.
- [56] S. Bordais, "Etude des amplificateurs et lasers 1  $\mu\text{m}$  de forte puissance à base de fibre double gaine dopée Ytterbium", Thèse de doctorat, Université Rennes 1, 2002.
- [57] W. H. Reeves, J. Knight, P. S. J. Russell, P. Roberts, "Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers", *J Optics Express*, 10, 609-613, 2002.
- [58] G. Vienne, Y. Xu, C. Jakobsen, H.-J. Deyerl, J. B. Jensen, T. Sørensen, T. P. Hansen, Y. Huang, M. Terrel, R. K. Lee, "Ultra-large bandwidth hollow-core guiding in all-silica Bragg fibers with nano-supports", *J Optics Express*, 12, 3500-3508, 2004.
- [59] D. Méchin, L. Brilland, J. Troles, Q. Coulombier, P. Houizot, A. Monteville, T. N. Nguyen, D. M. Nguyen, S. D. LeM. Thual, "Recent advances in very highly nonlinear chalcogenide photonic crystal fibers and their applications", *J IEEE Photonics Society Summer Topicals*, 117-118, 2010.
- [60] A. Amsanpally, "Linear properties of inhibited coupling hollow-core photonic crystal fibers", thèse de doctorat, Limoges, 2017.
- [61] S. A. Cerqueira, F. Luan, C. Cordeiro, A. George, J. Knight, "Hybrid photonic crystal fiber", *J Optics Express*, 14, 926-931, 2006.
- [62] M. Hermatschweiler, A. Ledermann, G. A. Ozin, M. Wegener, G. von Freymann, "Fabrication of silicon inverse woodpile photonic crystals", *J Advanced Functional Materials*, 17, 2273-2277, 2007.
- [63] G. Kim, T. Cho, K. Hwang, K. Lee, K. S. Lee, Y.-G. Han, S. B. Lee, "Strain and temperature sensitivities of an elliptical hollow-core photonic bandgap fiber based on Sagnac interferometer", *J Optics Express*, 17, 2481-2486, 2009.
- [64] N. Le Cong, "Développement d'un spectromètre femtoseconde à base d'une fibre à cristaux photoniques et photophysique ultra-rapide du vert de Malachite", Thèse de doctorat, Strasbourg, 2010.
- [65] M. Dossou, "Les modes de résonance acoustique dans les fibres optiques microstructurées-Applications aux capteurs répartis", Thèse de doctorat university of Lille 1, 2011.

- [66] L. Bahloul, L. Cherbi, M. TlidiH. Hariz, "Etude de l'influence des dispersions d'ordres supérieurs sur le résonateur à fibre cristal photonique", *J Open Access Proceedings*, 37, 2012.
- [67] F. X. Gelin Zhang, P. Yan, H. Wei, H. Li, S. Huang, R. LinK. Chen, "Double cladding seven-core photonic crystal fiber", *J Optics Photonics Journal*, 3, 47-49, 2013.
- [68] S. YinR. Guo, "Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications VIII", SPIE, 2014.
- [69] T. Saini, A. Baili, A. Kumar, R. Cherif, M. ZghalR. Sinha, "Design and analysis of equiangular spiral photonic crystal fiber for mid-infrared supercontinuum generation", *J Journal of modern optics*, 62, 1570-1576, 2015.
- [70] P. DupriezC. Aguegarary, "Advances in Integration of Photonic Crystal Fibers in High-power Fiber Laser", *Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications*, Optica Publishing Group, 2015.
- [71] M. F. H. Arif, K. Ahmed, S. AsaduzzamanM. A. K. Azad, "Design and optimization of photonic crystal fiber for liquid sensing applications", *J Photonic Sensors*, 6, 279-288, 2016.
- [72] A. A. Rifat, R. Ahmed, A. K. Yetisen, H. Butt, A. Sabouri, G. A. Mahdiraji, S. H. YunF. M. Adikan, "Photonic crystal fiber based plasmonic sensors", *J Sensors Actuators B: Chemical*, 243, 311-325, 2017.
- [73] D. Vigneswaran, N. Ayyanar, M. Sharma, M. Sumathi, M. RajanK. Porsezian, "Salinity sensor using photonic crystal fiber", *J Sensors Actuators A: Physical*, 269, 22-28, 2018.
- [74] S. Chugh, A. Gulistan, S. GhoshB. Rahman, "Machine learning approach for computing optical properties of a photonic crystal fiber", *J Optics Express*, 27, 36414-36425, 2019.
- [75] A. BertonciniC. Liberale, "3D printed waveguides based on photonic crystal fiber designs for complex fiber-end photonic devices", *J Optica*, 7, 1487-1494, 2020.
- [76] A. Shafkat, A. N. Z. Rashed, H. M. El-HageenA. M. Alatwi, "Design and analysis of a single elliptical channel photonic crystal fiber sensor for potential malaria detection", *J Journal of Sol-gel science technology*, 98, 202-211, 2021.
- [77] S. Asaduzzaman, H. Rehana, R. Chakma, O. S. Faragallah, H. S. El-Sayed, M. M. EidA. N. Z. Rashed, "Hexa-sectored square photonic crystal fiber for blood serum and plasma sensing with ultralow confinement loss", *J Applied Physics A*, 128, 467, 2022.
- [78] M. B. Hossain, J. Kříž, V. DhasarathanM. E. Rahaman, "Photonic crystal fiber (PhCF) for petrochemical sensing", *J Frontiers in Physics*, 10, 1097841, 2023.

- [79] M. El Amraoui, "Fibres optiques microstructurées chalcogénures fortement non linéaires à base AS<sub>2</sub>S<sub>3</sub>: vers de nouvelles sources supercontinuum infrarouges", Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2010.
- [80] G. Prabhakar, A. Peer, V. Rastogi, A. Kumar, "Large-effective-area dispersion-compensating fiber design based on dual-core microstructure", *J Applied Optics*, 52, 4505-4509, 2013.
- [81] X. Wang, S. Lou, W. Lu, "Bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core", *J Applied Optics*, 52, 4323-4328, 2013.
- [82] A. Roy, "Architectures de sources lasers blanches à fibres optiques microstructurées actives", Thèse de doctorat, Limoges, 2008.
- [83] R. Cregan, B. Mangan, J. Knight, T. Birks, P. S. J. Russell, P. Roberts, D. Allan, "Single-mode photonic band gap guidance of light in air", *J science*, 285, 1537-1539, 1999.
- [84] P. Roy, P. Leproux, S. Février, D. Pagnoux, J.-L. Auguste, J.-M. Blondy, S. Hilaire, L. Lavoute, R. Jamier, A. Desfarges-Berthelemot, "Photonic crystal fibres for lasers and amplifiers", *J Comptes Rendus Physique*, 7, 224-232, 2006.
- [85] A. Barrientos-Garcia, J. Andrade-Lucio, I. A. Sukhoivanov, I. Guryev, J. Ruiz-Pinales, R. Rojas-Laguna, "Numerical study of photonic crystal fiber with ultra-flattened chromatic dispersion in anomalous and normal dispersion regimes", *J Optik*, 126, 1307-1311, 2015.
- [86] A. Peyrilloux, "Modélisation et caractérisation des fibres microstructurées air/silice pour application aux télécommunications optiques", *J University of Limoges* <http://www.unilim.fr/theses/sciences/limo/notice.htm>, 2003.
- [87] R. Schreiber, "A. Bjarklev, J. Broeng and AS Bjarklev, Photonic Crystal Fibres, Kluwer Academic Publishers, Boston (2003) ISBN 1-4020-7610-X (XI/298pp., numerous figs., [euro] 149.00, US \$165.00 hardbound)", *J Optik*, 116, 541-541, 2005.
- [88] P. Gouriou, "Fibres microstructurées pour la mise en forme spatiale: fibres délivrant un mode fondamental aplati", Thèse de doctorat, Lille 1, 2017.
- [89] L. Provino, L. Brilland, A. Monteville, D. Landais, O. Le Goffic, D. Tregoat, D. Mechin, "Les fibres optiques microstructurées", *J Photoniques*, 47-50, 2013.
- [90] J. Knight, T. Birks, P. S. J. Russell, J. De Sandro, "Properties of photonic crystal fiber and the effective index model", *J JOSA A*, 15, 748-752, 1998.
- [91] N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg, M. D. Nielsen, K. P. Hansen, "Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers", *J Optics letters*, 28, 1879-1881, 2003.

- [92] F. Bréchet, J. Marcou, D. PagnouxP. Roy, "Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers, by the finite element method", *J Optical Fiber Technology*, 6, 181-191, 2000.
- [93] J. K. Ranka, R. S. WindelerA. J. Stentz, "Optical properties of high-delta air–silica microstructure optical fibers", *J Optics letters*, 25, 796-798, 2000.
- [94] J. K. Ranka, R. S. WindelerA. J. Stentz, "Visible continuum generation in air–silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm", *J Optics letters*, 25, 25-27, 2000.
- [95] P.-A. Champert, V. Couderc, P. Leproux, S. Février, V. Tombelaine, L. Labonté, P. Roy, C. FroehlyP. Nérin, "White-light supercontinuum generation in normally dispersive optical fiber using original multi-wavelength pumping system", *J Optics Express*, 12, 4366-4371, 2004.
- [96] X. Wang, K. KikuchiY. Takushima, "Analysis of dispersion-managed optical fiber transmission system using non-return-to-zero pulse format and performance restriction from third-order dispersion", *J IEICE transactions on communications*, 82, 1141-1147, 1999.
- [97] J. Nicholson, A. Abeeluck, C. Headley, M. YanC. Jørgensen, "Pulsed and continuous-wave supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion-shifted fibers", *J Applied Physics B*, 77, 211-218, 2003.
- [98] S. A. Razzak, Y. NamihiraF. Begum, "Ultra-flattened dispersion photonic crystal fibre", *J Electronics Letters*, 43, 1, 2007.
- [99] R. Cherif, M. ZghalH. Hamam, "Numerical Analysis of Stimulated Raman Scattering in Nonlinear Photonic Crystal Fiber for Broad Spectral Content", 2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications, IEEE, 2007.
- [100] G. P. Agrawal, "Lightwave technology: components and devices", John Wiley & Sons, 2004.
- [101] F. Poli, A. CucinottaS. Selleri, "Photonic crystal fibers: properties and applications", Springer Science & Business Media, 2007.
- [102] S. Chen, Z. Zhang, Q. WangF. Zhang, "Rayleigh Scattering Property in Photonic CrystalFiber", *J Journal of Tianjin University*, 40, 839-843, 2007.
- [103] Q. Xu, "Simulation on dispersion and birefringence properties of photonic crystal fiber", *J Chinese Optics Letters*, 12, 011302-311304, 2014.

- [104] J. Knight, T. Birks, R. Cregan, P. S. J. Russell, J. De Sandro, "Large mode area photonic crystal fibre", *J Electronics Letters*, 34, 1347-1348, 1998.
- [105] R. Cherif, "Étude des effets non-linéaires dans les fibres à cristaux photoniques", Thèse de doctorat, Université 7 novembre à Carthage, 2009.
- [106] H. Pakarzadeh, M. Taghizadeh, M. Hatami, "Designing a photonic crystal fiber for an ultra-broadband parametric amplification in telecommunication region", *J Journal of Nonlinear Optical Physics Materials*, 25, 1650023, 2016.
- [107] P. Jaworski, "Negative curvature fibre optics for delivery of high-peak power light for manufacturing applications", Thèse de doctorat, Heriot-Watt University, 2015.
- [108] K. R. Khan, M. F. Mahmood, A. Biswas, "Coherent super continuum generation in photonic crystal fibers at visible and near infrared wavelengths", *J IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 20, 573-581, 2014.
- [109] A. Bétourné, "Conception et caractérisation de nouvelles fibres optiques à cristal photonique dites hybrides et applications à l'optique non linéaire", Lille 1, 2010.
- [110] P. S. Light, "Photonic microcells for quantum optics applications", Thèse de doctorat, University of Bath, 2008.
- [111] A. Mussot, "Amplification paramétrique dans les fibres optiques pour les télécommunications à haut débit", Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2004.
- [112] S. Y. Ryu, H. Y. Choi, J. Na, E. Choi, G.-H. Yang, B. H. Lee, "Optical coherence tomography implemented by photonic crystal fiber", *J Optical Quantum Electronics*, 37, 1191-1198, 2005.
- [113] K. Nyachionjeka, H. Tarus, K. Langat, "Design of a photonic crystal fiber for optical communications application", *J Scientific African*, 9, e00511, 2020.
- [114] J. N. Dash, R. Jha, S. Dass, "Ultrasensitive displacement sensor based on photonic crystal fiber modal interferometer", *Optical Sensors*, Optica Publishing Group, 2014.
- [115] G. Rajan, M. Ramakrishnan, Y. Semenova, A. Domanski, A. Bockowska, T. Wolinski, G. Farrell, "Analysis of vibration measurements in a composite material using an embedded PM-PCF polarimetric sensor and an FBG sensor", *J IEEE Sensors Journal*, 12, 1365-1371, 2011.
- [116] M. Debbal, M. Bouregaa, H. Chikh-Bled, M. E. K. Chikh-Bled, M. C. E. Ouadah, "Influence of temperature on the chromatic dispersion of photonic crystal fiber by

- infiltrating the air holes with water", *J Journal of Optical Communications*, 44, 163-166, 2023.
- [117] I. Mired, M. DebbalH. Chikh-Bled, "Pressure Sensing Based on Photonic Crystal Fiber by Infiltrating the Air-Holes with Water", *J Progress in Electromagnetics Research C*, 130, 2023.
- [118] H. Liang, Y. Feng, H. Liu, W. HanT. Shen, "High-performance PCF-SPR sensor coated with Ag and graphene for humidity sensing", *J Plasmonics*, 17, 1765-1773, 2022.
- [119] A. Talbi, F. Sarry, M. Elhakiki, L. Le Brizoual, O. Elmazria, P. NicolayP. Alnot, "ZnO/quartz structure potentiality for surface acoustic wave pressure sensor", *J Sensors Actuators A: Physical*, 128, 78-83, 2006.
- [120] V. S. Chaudhary, D. Kumar, B. P. PandeyS. Kumar, "Advances in photonic crystal fiber-based sensor for detection of physical and biochemical parameters-a review", *J IEEE Sensors Journal*, 2022.
- [121] V. Portosi, D. Laneve, M. C. FalconiF. Prudenzano, "Advances on photonic crystal fiber sensors and applications", *J Sensors*, 19, 1892, 2019.

**Chapitre II:**

**Généralité sur les capteurs**

### II.1. Introduction

Les capteurs jouent un rôle fondamental dans notre vie courante et dans de différentes applications industrielles, scientifiques et technologiques. Ils sont des dispositifs conçus pour détecter et mesurer diverses grandeurs physiques, telles que le mouvement, le son, l'humidité, la température, la lumière, la pression, la présence d'une substance chimique, et bien d'autres encore. Ces capteurs sont essentiels pour recueillir des informations sur l'environnement qui nous entoure et les convertir en signaux exploitables par des dispositifs électroniques. Les capteurs électriques englobent une variété de dispositifs, chacun spécialement adapté à la détection et à la mesure de grandeurs particulières, telles que le courant électrique, la tension, le champ magnétique, la lumière, la température et bien d'autres. Ils sont utilisés dans des secteurs de l'électronique, de l'industrie et la médecine, de l'automobile à la robotique, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de vie, à l'efficacité des processus industriels et au développement de technologies de pointe.

Les capteurs à fibre optique sont des dispositifs innovants qui exploitent les propriétés de la lumière pour détecter, mesurer et surveiller une variété de grandeurs physiques. Ces capteurs utilisent des fibres optiques, des fils minces en verre ou en plastique, pour acheminer la lumière d'un point à un autre tout en captant des informations sur les changements qui surviennent le long de leur trajet. Cette technologie fascinante a ouvert de nouvelles perspectives dans de différentes attributions, de l'industrie à la recherche scientifique en passant par la médecine et l'ingénierie. L'utilisation de fibres optiques pour la détection remonte à plusieurs décennies, mais les récentes avancées technologiques ont considérablement élargi leur champ d'application. Les capteurs à fibre optique sont devenus essentiels dans des domaines tels que la surveillance des infrastructures, la détection de contraintes mécaniques, la mesure de température, la détection de pression, la surveillance des réseaux de télécommunication, la médecine, la recherche environnementale et bien d'autres.

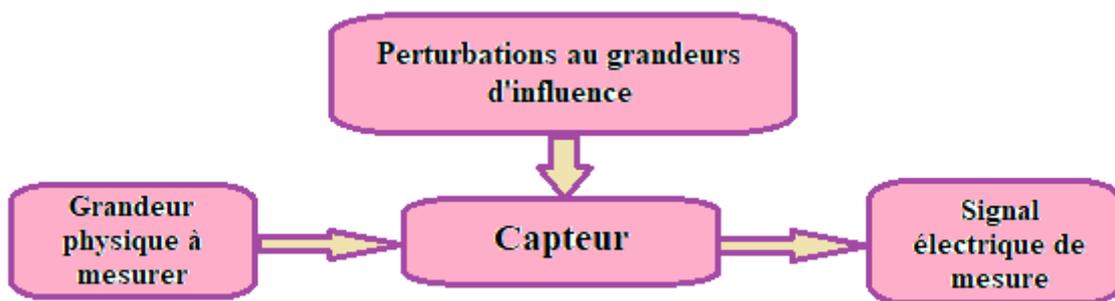
Ce chapitre définit la notion de capteur et donne une description qualitative du capteur à fibre optique, ainsi que ses caractéristiques, ses avantages et son principe de fonctionnement. Nous portons une attention particulière aux capteurs à fibre microstructurée qui est le sujet de notre thèse.

### II.2. Capteurs classiques

#### II.2.1. Définition

Un capteur est un dispositif capable de convertir une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, comme la tension électrique, la hauteur de mercure, l'intensité ou la déviation d'une aiguille comme la montre la figure II.1. Il est courant de confondre à tort le capteur et le transducteur, mais il est important de noter qu'au minimum, le capteur comprend un transducteur [1].

Les systèmes d'acquisition de données sont basés sur des capteurs. Ils relèvent du domaine de l'instrumentation. En général, la grandeur de sortie est obtenue en utilisant le type électrique. Il peut s'agir d'une charge, d'une tension, d'un courant ou d'une impédance.



**Figure II. 1** Définition d'un capteur classique [1].

On peut définir le principe de fonctionnement d'un capteur comme suit :

Un capteur a pour fonction de recueillir une grandeur abstraite désignée comme information, choisissant ainsi un événement spécifique parmi un ensemble d'événements potentiels. Le signal est un moyen physique par lequel cette information sera transmise pour être traitée. Un capteur peut fournir des informations logiques numériques ou analogiques.

Chaque catégorie de capteur peut être subdivisée en plusieurs sous-catégories en fonction du mécanisme d'apport d'énergie à l'élément sensible, permettant ainsi la conversion du phénomène physique en un signal exploitable. Les sous-catégories comprennent les capteurs mécaniques, électriques, optiques, etc.

#### II.2.2. Principales caractéristiques des capteurs

Les critères de sélection d'un capteur approprié pour les applications désirées nécessitent l'élaboration d'un cahier des charges dans lequel sont énumérés [2]:

- Le type de la grandeur à détecter.
- La nature de cette grandeur.
- La taille et les dimensions de cette grandeur.
- L'environnement où se passe cette grandeur.

Le choix du capteur est effectué en tenant compte de ces paramètres. Des ajustements sont nécessaires pour utiliser un capteur dans des conditions optimales afin de déterminer les incertitudes de mesure associées aux caractéristiques suivantes des paramètres :

### **II.2.1.1 Etendue de la mesure ou dynamique**

Elle détermine la zone dans laquelle les performances du capteur sont garanties par rapport aux spécifications données [2].

### **II.2.1.2 Résolution**

Correspond au plus petit incrément de la valeur mesurée que le capteur peut mesurer de manière significative. La résolution  $R_m$  dépend du rapport signal/bruit du capteur et des caractéristiques des instruments de mesure associés au capteur [2].

### **II.2.1.3 Fonction de transfert**

Elle décrit la relation entre l'évolution de la grandeur d'entrée et la grandeur de sortie d'un capteur. Cette relation est généralement représentée par une courbe en régime permanent et ne fournit aucune information sur les caractéristiques transitoires du capteur [2].

### **II.2.1.4 Fiabilité**

La capacité d'un capteur à fonctionner correctement, c'est-à-dire à fournir des données avec une précision annoncée est appelée fiabilité.

### **II.2.1.5 Sélectivité**

La sélectivité d'un capteur représente sa capacité à différencier une substance d'une autre. Cette caractéristique dépend de l'élément du capteur qui est le plus sensible à ces distinctions.

### **II.2.1.6 Etalonnage**

L'ajustement et la détermination de la relation entre la mesurande et la grandeur électrique de sortie peuvent être représentés graphiquement grâce à l'étalonnage (Figure II.2). Très souvent, l'étalonnage n'est autorisé qu'en cas d'utilisation unique du capteur.

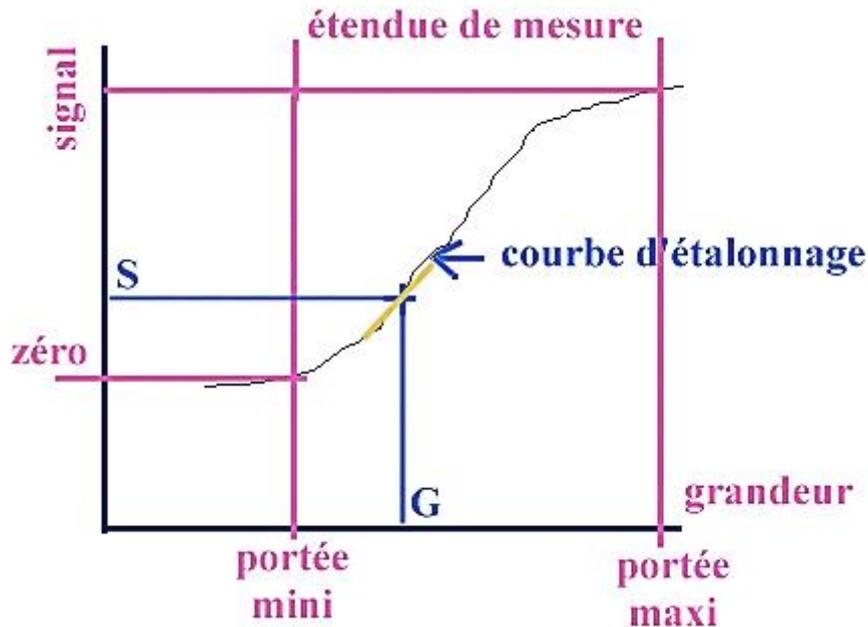


Figure II. 2 L'étalonnage dans un capteur [3].

### II.2.1.7 Linéarité

Il s'agit de la plage de réponse du capteur où sa sensibilité reste constante par rapport à la grandeur mesurée. Si le capteur maintient la même sensibilité sur l'ensemble de sa plage d'utilisation, on le considère comme linéaire. La définition de cette zone peut être basée sur la définition d'une droite qui peut être utilisée pour approcher au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple en utilisant la méthode des carrés. En tenant compte des incertitudes  $\sigma_i$  associées à chaque point de mesure, l'ajustement au moindre carré  $x^2$  vise à minimiser l'écart entre la caractéristique linéarisée et la réponse expérimentale [2]:

$$x^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{s(e_i) - s_{ln}(e_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad \text{II. 1}$$

Ou  $e_i$  représente la  $i^{\text{ème}}$  valeur de l'entrée  $e$  et  $s_{ln}$  la caractéristique linéarisée.

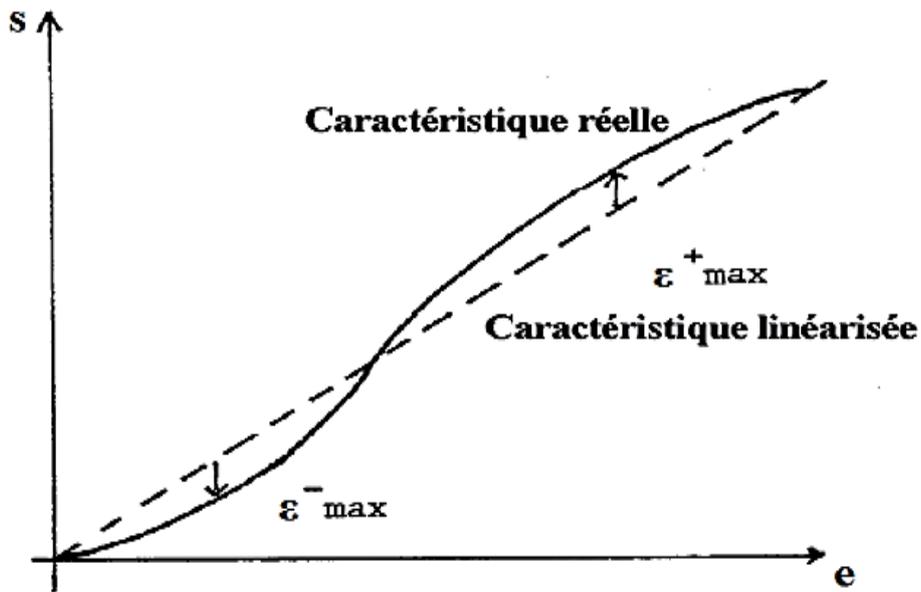


Figure II. 3 Exemple de linéarisation de caractéristique [2].

### II.2.1.8 Caractéristiques statistiques

Les caractéristiques statiques qui prennent en compte la possibilité d'erreurs involontaires sur un capteur sont comme suit [2]:

- a. **Fidélité** : La capacité d'un capteur à produire des résultats aussi précis que possible lors d'analyses répétées d'une même grandeur physique  $m$  est évaluée en termes d'écart de fidélité. On distingue :
  - **Répétabilité** :  
La dispersion aléatoire des résultats obtenus lors d'une série de mesures successives d'une même grandeur physique  $m$ , effectuées dans des conditions identiques sur une courte période, est désignée sous le terme de répétabilité.
  - **Reproductibilité** : Elle met en évidence la variabilité aléatoire des résultats provenant de multiples séries de mesures réalisées sur la même grandeur  $m$ , avec des espacements temporels et dans des conditions expérimentales différentes.
- b. **Justesse** : La justesse d'un capteur se réfère à sa capacité à produire une réponse qui est proche de la valeur réelle, indépendamment de la fidélité. Elle est associée à la concordance entre la valeur réelle et la moyenne des résultats obtenus sur un ensemble étendu de mesures.
- c. **Précision** : est l'écart en pourcentage entre la valeur réelle d'une grandeur et la valeur fournie en sortie par le capteur.

### II.2.1.9 Rapidité

Le temps que met un capteur pour réagir à une variation soudaine de la grandeur mesurée est appelé rapidité. Cependant, la valeur finale, souvent atteinte de manière asymptotique, représente le temps nécessaire au capteur pour fournir une proportion  $\alpha$  de l'amplitude totale du signal. Le temps de réponse, noté  $t\alpha$ , est généralement établi à 90 %. Lors de la réalisation de mesures, il est essentiel de prendre en compte le temps de réponse d'un capteur [2].

### II.2.1.10 Sensibilité

La sensibilité, notée  $S$ , joue un rôle crucial dans la sélection d'un capteur. Elle est définie autour d'une valeur moyenne constante du capteur et est exprimée par le rapport de la variation  $\Delta s$  de la grandeur de sortie à la variation  $\Delta m$  de la grandeur d'entrée qui a engendré cette variation [2].

$$s = \left( \frac{\Delta s}{\Delta m} \right) m = m_i \quad \text{II. 2}$$

La sensibilité d'un capteur est proportionnelle à la pente de la courbe générée par ses caractéristiques à un certain point. Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité reste constante et est proportionnelle à la pente de la droite. Il est crucial de noter que cette propriété est inhérente au capteur et ne dépend pas des autres équipements de mesure associés dans une chaîne de mesure (comme illustré dans la figure II.4). Par conséquent, la sensibilité du capteur augmente avec la grandeur intrinsèque du capteur [4].



**Figure II. 4** Schéma représentatif d'une chaîne de mesure [4].

Le corps d'épreuve est celui qui est directement en contact avec le phénomène à quantifier. Le conditionneur fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable.

Le constructeur donne généralement la valeur de la sensibilité dans des conditions d'emploi spécifiques, ce qui permet à l'utilisateur de [5]:

- Évaluer l'amplitude de la réponse du capteur en considérant les variations typiques de ce dernier.
- Sélectionner le capteur de manière à ce que l'ensemble de la chaîne de mesure réponde aux critères de mesure requis.

### II.2.1.11 Limite de détection

La limite de détection, représentant la valeur minimale de la grandeur physique détectable, diffère de la sensibilité du capteur, étant influencée à la fois par la sensibilité du capteur et la résolution instrumentale ( $R_m$ ) associée au matériel de mesure. Ainsi, la limite de détection permet d'évaluer la performance de l'association entre le capteur et le dispositif de mesure, et elle est d'autant plus efficace lorsque sa valeur est basse. L'expression de la limite de détection (LD), dérivée de la définition de la sensibilité du capteur, est la suivante [6] :

$$LD = \frac{R_m}{S_v} \quad \text{II. 3}$$

### II.2.3. Types des capteurs

On peut classer les capteurs en deux catégories en fonction de l'origine du signal électrique de sortie :

#### II.2.3.1. Capteurs actifs

C'est un capteur qui génère un signal électrique en convertissant une grandeur physique en un signal électrique, adoptant la forme d'énergie propre au mesurande, que ce soit de l'énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Cette transformation permet une mesure plus directe et plus précise de la grandeur physique car elle se fait sans l'utilisation de composants externes ou d'autres instruments de mesure [7].

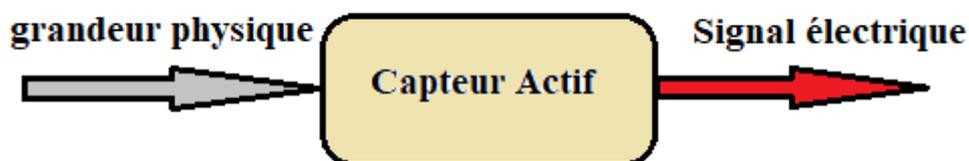


Figure II. 5 Schéma représentatif d'un capteur actif [7].

La conversion de grandeur physique en signal électrique par ce type de capteur, illustré schématiquement sur la figure II.5, s'effectue sans nécessiter une source d'énergie externe.

### II.2.3.2. Capteurs passifs

En général, Il s'agit d'une impédance dont l'un de ses paramètres clés est influencé par la grandeur mesurée. Les capteurs passifs, contrairement aux capteurs actifs, nécessitent une source d'énergie électrique pour mesurer et traiter le signal électrique. La figure II.6 montre un schéma représentatif d'un capteur passif. Selon l'application particulière, cette source d'énergie peut être fournie par des équipements externes ou intégrée au capteur lui-même. Cette variation résulte [8]:

- Une modification des dimensions du capteur (tel qu'un capteur de pression, un potentiomètre, une inductance à noyau mobile, un condensateur à armature mobile).
- Une déformation (pression, accélération...)

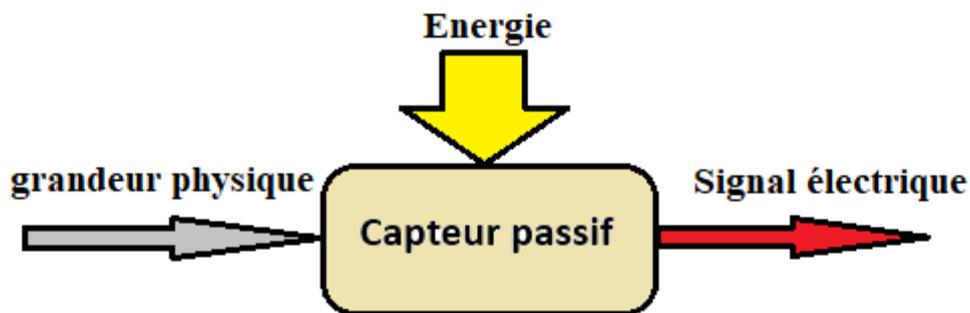


Figure II. 6 Schéma représentatif d'un capteur passif [8].

### II.2.3.3. Capteur composite :

Un capteur composite est un dispositif qui combine un corps d'épreuve avec un capteur actif ou passif pour mesurer une grandeur physique spécifique. Le corps d'essai est soumis à des mesures physiques comme la pression, la température ou l'humidité et produit une mesure physique non électrique appelée mesure secondaire.

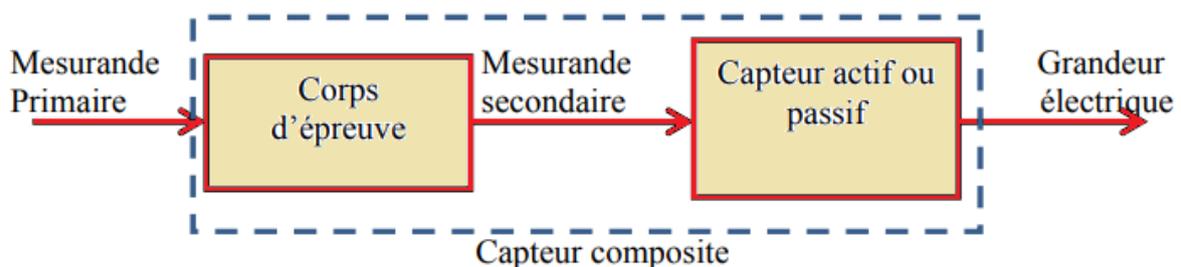


Figure II. 7 Schéma représentatif d'un capteur composite [9].

Le capteur actif ou passif traduit ensuite cette grandeur en une grandeur électrique, qui produit un signal électrique utilisable pour la mesure et le traitement des données. Les capteurs composites, comme le montre la figure II.7, sont largement utilisés pour mesurer des grandeurs physiques critiques dans une variété d'applications, notamment dans l'aéronautique, l'automobile et l'environnement.

### II.2.4. Grandeurs d'influence

En raison de ses conditions d'utilisation, le capteur peut être soumis à des fluctuations de grandeurs physiques telles que le mesurande et d'autres paramètres, engendrant une variation de la grandeur électrique de sortie. Il peut être complexe de distinguer ce changement de la réponse du capteur de l'influence du mesurande. Les grandeurs d'influence représentent des variables physiques "parasites" susceptibles d'affecter la réponse du capteur. Par exemple :

- La température constitue une grandeur d'influence pour un capteur optique tel que la résistance photoconductrice.
- Cela s'applique également au champ magnétique d'un capteur thermométrique, tel que la résistance de germanium.

Parmi les grandeurs d'influence, on a [10-12] :

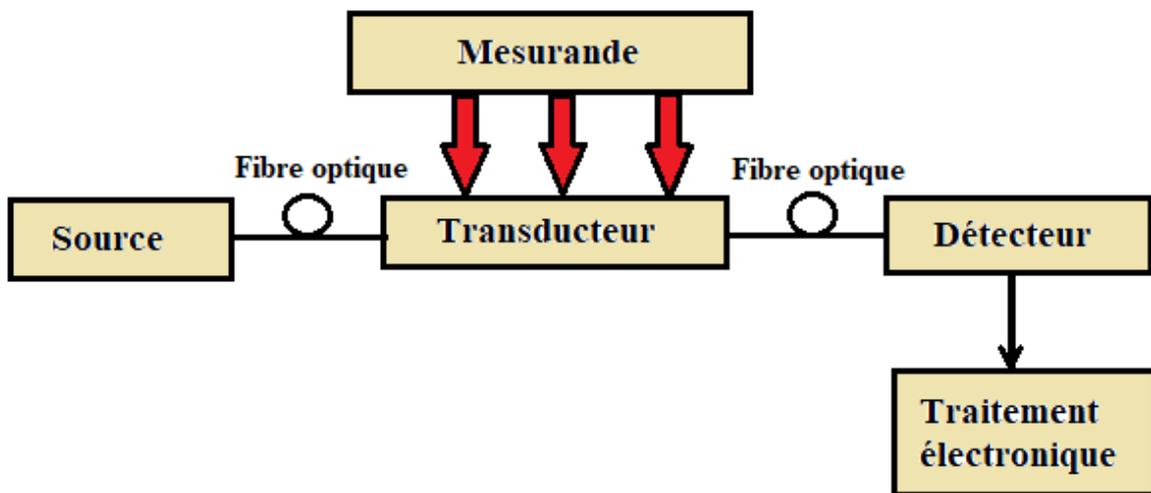
- La température exerce une influence sur les propriétés électriques, mécaniques et dimensionnelles des éléments du capteur.
- La pression, l'accélération et les vibrations peuvent provoquer des déformations et des contraintes dans certains éléments constitutifs du capteur, ce qui altère la réponse.
- L'humidité peut impacter certaines propriétés électriques telles que la constante diélectrique ou la résistivité, et présente le risque de détériorer l'isolation électrique entre les composants du capteur ou entre le capteur et son environnement.
- La tension, l'amplitude et la fréquence de l'alimentation, comme pour un transformateur différentiel, dépendent du principe du capteur.
- Les perturbations électromagnétiques, les rayonnements nucléaires.

### II.3. Capteurs optiques

Les capteurs optiques ont été considérés comme une alternative aux dispositifs électroniques classiques, planaires, fragiles, moins flexibles et rigides [13]. Par rapport aux capteurs optiques, les dispositifs électroniques présentent certaines limitations majeures, telles qu'un coût de fabrication élevé, une procédure complexe, un temps de réponse et une fiabilité, plus lents. Les

dispositifs électroniques sont également affectés par des bruits ou des interférences électromagnétiques (EM) et thermiques [14]. De nos jours, la détection basée sur une fibre optique est utilisée pour détecter et surveiller un environnement complexe et son entourage, comme la température, l'humidité, la déformation, le stress, la pression et la torsion, etc. Elle a des applications importantes dans les capteurs portables, la robotique, la santé et la surveillance de la sécurité [15-18].

La structure générale d'un système de capteurs à fibres optiques est illustrée à la figure II.8. Il se compose d'une source optique (laser, LED, diode laser, etc.), d'une fibre optique, d'un capteur ou modulateur, (qui transduit le mesurande en un signal optique) d'un détecteur optique et d'une électronique de traitement (oscilloscope, analyseur de spectre optique, etc.) [19].



**Figure II. 8** Composants de base d'un système de capteurs à fibre optique [20].

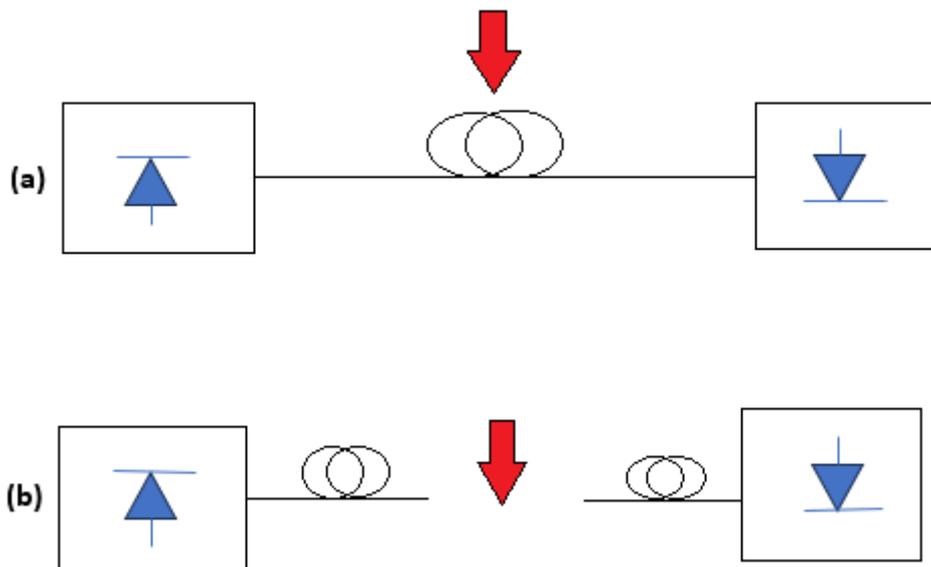
En générale, l'architecture d'un capteur optiques contient les composants suivants [21]:

- Source lumineuse joue le rôle d'un émetteur de lumière monochromatiques, cohérente ou non, continu ou impulsionnelles.
- Une fibre optique (monomode ou multimode) spécialement conçue pour effectuer une mesure dans un contexte spécifique. Il doit généralement être accompagné d'équipements supplémentaires tels que des coupleurs, des polariseurs, des connecteurs optiques, etc.
- Un transducteur, qui réagit à la grandeur physique à mesurer, modifie le signal émis par la source et établit une correspondance entre la valeur de cette grandeur et l'une des caractéristiques lumineuses telles que l'intensité, la polarisation, la longueur d'onde, etc.

- Un détecteur ou récepteur de lumière est habituellement composé d'une ou plusieurs photodiodes, accompagnées d'un étage électronique d'amplification, d'une chaîne de traitement du signal visant à extraire des informations sur la grandeur mesurée, ainsi que des circuits d'alimentation en énergie.

Aujourd'hui, les capteurs à fibre optique jouent un rôle majeur dans les applications industrielles, médicales, aérospatiales et grand public. D'une manière générale, un capteur à fibre optique peut être classé comme intrinsèque ou extrinsèque.

Dans le cas d'un capteur intrinsèque (Figure II.9(a)), le paramètre physique ou l'effet à détecter module les propriétés de transmission de la fibre optique, tandis que dans un capteur extrinsèque (Figure II.9(b)), la modulation a lieu à l'extérieur de la fibre [22]. Dans le premier cas une ou plusieurs des propriétés physiques de la lumière guidée, par exemple l'intensité, la phase, la polarisation et la longueur d'onde/couleur, sont modulées par les mesurandes, alors que dans le second cas, la fibre sert simplement de conduit pour transporter le signal lumineux du capteur à un puissance mètre optique pour la détection et la mesure quantitative [22].

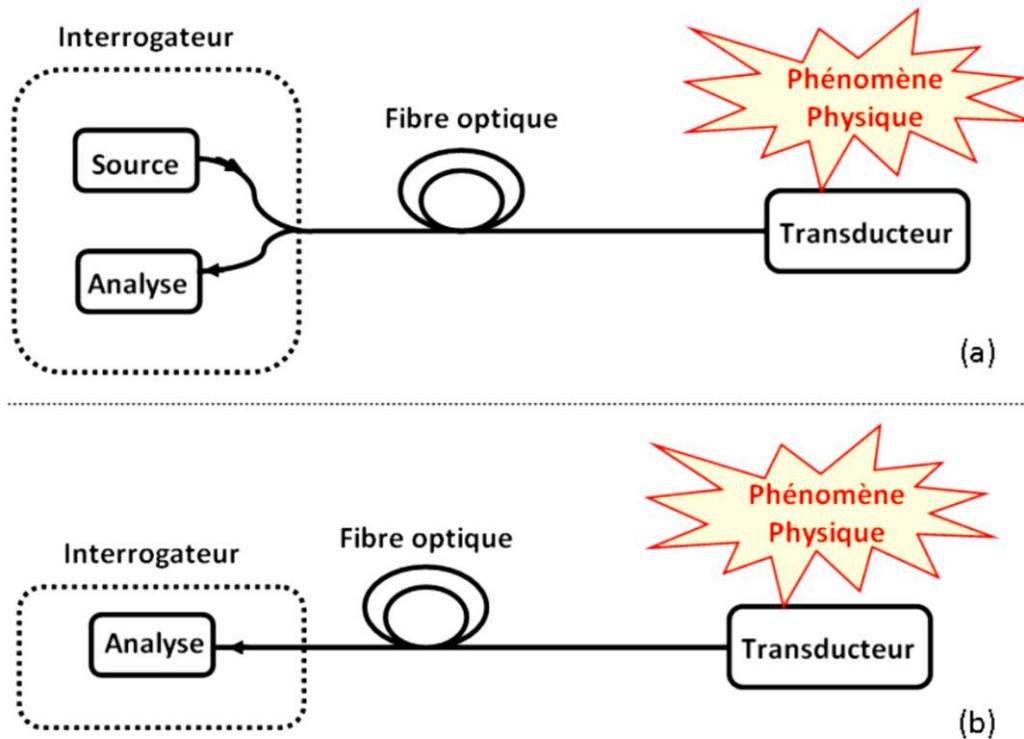


**Figure II. 9** Exemples de capteurs à fibres (a) intrinsèques (b) extrinsèques [1].

Comme pour les capteurs standard, on peut distinguer deux grandes familles de capteurs optiques : actifs et passifs.

Un capteur optique actif se compose d'une source lumineuse, d'une fibre optique, d'un élément sensible ou transducteur, et d'un détecteur. En l'absence de source lumineuse, un capteur est

qualifié de passif, car la lumière est générée par un phénomène physique ou par le transducteur lui-même [23].



**Figure II. 10** Principe de fonctionnement d'un capteur optique (a) actif (b) passif [23].

### II.3.1. Différents types de capteur optiques

Dans le domaine des télécommunications optiques, l'adoption de composants optiques tels que la fibre optique standard ou sous-marine a permis de contourner les perturbations électromagnétiques de basse fréquence et de minimiser les pertes optiques lors de la propagation [24]. Cette évolution a ouvert la voie à des études approfondies sur le comportement des dispositifs optiques face aux perturbations environnementales. En conséquence, il devient possible de concevoir des capteurs optiques performants en se concentrant sur divers mécanismes d'interactions physiques externes que l'on souhaite détecter [25]. Plusieurs capteurs optiques, y compris les capteurs de pression [26], de température [27], de vitesse [28], de position [29], d'humidité [30] et biologiques [31], sont actuellement disponibles.

Enfin, selon la méthode de mesure, les capteurs à fibres optiques sont divisés en deux catégories :

- Les mesures localisées sont celles qui sont recueillies à des endroits discrets de la fibre.
- Les mesures distribuées sont réalisées tout au long de la fibre optique.

### II.3.1.1. Capteurs à fibres optiques localisés

Pour les mesures instantanées, le phénomène physique ou chimique est évalué localement, généralement à l'extrémité de la fibre, par exemple. La région sensible de mesure dans la fibre peut varier, allant de quelques centimètres pour les capteurs à réseau de Bragg [32] jusqu'à plusieurs mètres pour les capteurs interférométriques [33].

Ce type de capteur permet la mesure de divers paramètres tels que la déformation, la température, la pression, la corrosion, tant en situation statique que dynamique. Bien qu'ils ne soient pas idéaux pour la surveillance globale de vastes structures, ils s'avèrent très utiles pour des besoins ponctuels ou dans des espaces limités. Cependant, pour la surveillance de grandes structures, il serait nécessaire d'utiliser un grand nombre de capteurs et de mettre en place un multiplexage important afin d'éviter les zones non couvertes entre les capteurs. Ces zones pourraient compromettre la détection d'événements très localisés tels que des fissures ou des tassements de sol.

### II.3.1.2. Capteurs à fibres optiques distribués

Ces capteurs mesurent l'intégralité de la longueur de la fibre, permettant ainsi la détermination et la mesure d'une grandeur sur une portion spécifique, qu'elle soit courte ou étendue. Dans ce contexte, tous les points de la fibre sont sensibles, autorisant la mesure globale de la fibre sur des distances allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de kilomètres, avec une résolution pouvant atteindre des millimètres. Ces capteurs sont particulièrement adaptés à des applications de surveillance telles que la monitoring de pipelines et de forages [34]. Pour la surveillance de vastes structures d'art de grande envergure et le suivi des déformations dans des ouvrages en béton tels que des ponts, barrages et enceintes, l'utilisation de capteurs distribués sur toute la longueur de la fibre optique peut être particulièrement efficace [35]. La surveillance des températures dans les générateurs électriques, les réacteurs, les digues en terre, ainsi que la détection et le suivi des incendies, constituent des domaines d'application où l'utilisation ces capteurs basés sur la fibre optique se révèle particulièrement pertinente [36]. La mesure continue en temps réel sur la fibre constitue un avantage indéniable. Les méthodes de mesure appliquées dans ce contexte reposent principalement sur trois types distincts de diffusions, parmi lesquelles la diffusion Rayleigh [37], la diffusion Brillouin [38] et la diffusion Raman [39]. Chaque type de diffusion a ses propres caractéristiques de portée, de résolution spatiale et de temps de mesure.

Deux techniques principales sont utilisées pour fonctionner les systèmes de mesure distribués par fibre optique [21]:

### *a.* Réflectométrie optique dans le domaine temporel

La réflectométrie optique dans le domaine temporel (RDOT ou OTDR - Optical Time Domain Reflectometry en anglais) est une technique largement utilisée pour mesurer la réflectance et l'atténuation dans les fibres optiques, puissante et appliquée pour caractériser, diagnostiquer et surveiller les fibres optiques dans diverses applications, notamment dans les réseaux de télécommunication et les infrastructures de communication [40]. Elle est appliquée pour :

- Localisation de défauts : L'OTDR peut détecter des défauts tels que des coupures, des connexions imparfaites ou des perturbations dans la fibre, permettant aux ingénieurs de localiser rapidement le problème.
- Caractérisation de la fibre optique : la mesure de sa réflectance et de son atténuation aide à évaluer ses performances et ses propriétés optiques.
- Surveillance des réseaux de communication : L'OTDR est utilisé pour surveiller en continu les fibres optiques dans les réseaux de télécommunication, ce qui permet de détecter rapidement tout problème potentiel.
- Maintenance préventive : En identifiant les zones sujettes à des dégradations, la réflectométrie optique est utilisée pour planifier la maintenance préventive des réseaux de fibres optiques.

### *b.* Réflectométrie optique dans le domaine fréquentiel

La réflectométrie optique dans le domaine fréquentiel (OFDR - Optical Frequency Domain Reflectometry en anglais) est une technique avancée qui offre des capacités supplémentaires par rapport à la réflectométrie optique traditionnelle dans le domaine temporel (OTDR). Contrairement à l'OTDR qui utilise des impulsions optiques, le OFDR utilise des signaux optiques modulés en fréquence pour caractériser les propriétés des fibres optiques [41]. Elle est largement utilisée pour :

- Détection de défauts à haute résolution : Le OFDR peut localiser les défauts dans la fibre avec une résolution spatiale élevée, ce qui le rend idéal pour la détection de petites fissures ou autres anomalies.
- Caractérisation des pertes et de la dispersion : Le OFDR peut être utilisé pour mesurer les pertes de puissance et les variations de dispersion chromatique le long de la fibre optique.

- La surveillance de la santé de la fibre est utilisée pour surveiller la santé des fibres optiques à long terme, ce qui permet une maintenance proactive et une détection précoce des dégradations.
- Détection d'intrusions : Le OFDR peut être utilisé pour détecter des perturbations ou des intrusions sur les fibres optiques, comme celles utilisées dans les clôtures de périmètre ou les capteurs de sécurité, dans certaines applications de sécurité.

### II.3.2. Propriétés optiques de guidage des capteurs à base des fibres optiques

Les meilleures propriétés de guidage optique garantissent l'application des PCF en tant que capteurs sont examinées en détail par la suite [42]:

#### II.3.2.1. Sensibilité relative

Avant tout, la nature d'un PCF utilisé comme capteur est nécessaire pour calculer la réponse de sensibilité relative. La réponse de sensibilité relative d'un PCF indique la capacité de détection du PCF proposé. La sensibilité relative est symbolisée par  $r$  et peut être calculée à l'aide de l'équation suivante [43] :

$$r = \frac{n_s}{\text{Re}[n_{\text{eff}}]} f \quad \text{II. 4}$$

Où  $n_s$  est l'indice de réfraction de l'espèce gazeuse cible, généralement considéré comme égal à 1 et  $\text{Re}[n_{\text{eff}}]$  est la partie réelle de l'indice du mode effectif. Ici,  $f$  est la fraction de la puissance des trous par rapport à la puissance optique totale, qui peut être définie comme [44]:

$$f = \frac{\int_{\text{holes}} \text{Re}(\mathbf{E}_x \mathbf{H}_y - \mathbf{E}_y \mathbf{H}_x) dx dy}{\int_{\text{total}} \text{Re}(\mathbf{E}_x \mathbf{H}_y - \mathbf{E}_y \mathbf{H}_x) dx dy} \quad \text{II. 5}$$

#### II.3.2.2. Perte de confinement

La perte de confinement ou perte de fuite est due à la nature non étanche du mode et à la disposition irrégulière des trous d'air. Ces trous d'air jouent le rôle de milieu diélectrique. La perte de confinement dépend également de la longueur d'onde transmise, de la forme et de la taille des paramètres, du nombre de trous et des anneaux. La perte de confinement ou perte de fuite est due à la nature non étanche du mode et à la disposition irrégulière des trous d'air. Ces trous d'air jouent le rôle de milieu diélectrique. La perte de confinement dépend également de la longueur d'onde transmise, de la forme et de la taille des paramètres, du nombre de trous et

des anneaux. Une couche anisotrope parfaitement adaptée de forme circulaire (C-APML) est utilisée pour satisfaire la condition de limite qui évite la réflexion électromagnétique indésirable à la limite de la PCF. Par ce terme, la perte de confinement ou la perte de fuite peut être calculée par la partie imaginaire de l'indice de réfraction effectif comme suit [44] :

$$L_c[\text{dB/m}] = 8.686K_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6 \quad \text{II.6}$$

Où  $K_0=2\pi/\lambda$ , est le nombre d'onde et  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  est la partie imaginaire de l'indice de réfraction effectif.

### I.3.3.7 Biréfringence

La biréfringence est l'une des caractéristiques essentielles des PCF. Elle a un impact significatif sur les fibres PMF. La biréfringence est une caractéristique d'une PCF qui résulte d'une asymétrie géométrique spécifique basée sur la position des trous d'air. La biréfringence d'ordre supérieur est produite par une asymétrie structurelle élevée de PCF, en particulier le premier anneau de PCF, et la symétrie structurelle de PCF n'a aucune influence sur la production de biréfringence. La formulation mathématique de la biréfringence est la suivante [45]:

$$B(\lambda) = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y| \quad \text{II.7}$$

### II.3.2.3. Longueur de battement

Un autre facteur qui dépend de la longueur d'onde est la longueur de battement. La découverte des fibres optiques biréfringentes dépend de la longueur de battement. Lorsque la différence de phase entre deux états de polarisation orthogonaux est de 360 degrés ou  $2\pi$  radians, elle définit la longueur de transmission du signal optique le long de la fibre. Cette caractéristique provoque un échange de puissance périodique entre deux composants orthogonaux. Cette durée est connue sous le nom de longueur de battement et peut être calculée en utilisant l'expression suivante [46]:

$$L_B(\lambda) = \frac{\lambda}{B(\lambda)} \quad \text{II.8}$$

### II.3.2.4. Fréquence effective (Paramètre V)

Une PCF est soit monomode, soit multimode. Pour l'analyse modale, une valeur de coupure est toujours présente. Les opérations monomodes sont autorisées si la valeur de V est inférieure ou égale à 2.405, tandis que les opérations multimodes sont autorisées si la valeur de V est

supérieure ou égale à 2,405. Le paramètre  $V$ , qui est défini comme suit, peut être utilisé pour déterminer la réponse monomode d'une fibre à indice progressif [47]:

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{g}}^2} \quad \text{II.9}$$

Dans ce cas,  $n_{\text{co}}$  et  $n_{\text{g}}$  sont les indices de réfraction du cœur et de la gaine, tandis que le rayon du cœur de la fibre est  $a$ . Le nombre  $V$  d'un cœur de fibre limite la fraction de puissance optique dans un certain mode. La fraction de puissance optique diminue avec la valeur  $V$  et vice-versa.

### II.3.2.5. Surface effective

La zone de mode optimale est généralement appelée zone de transport de la lumière. La distribution du champ électrique ( $E$ ) se produit à l'intérieur du noyau dans le mode de propagation fondamental, de sorte que la zone de mode effective (EMA) d'une PCF peut être déterminée par l'équation suivante [48]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\int \int |\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y})|^2 d\mathbf{x}d\mathbf{y})^2}{\int \int |\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y})|^4 d\mathbf{x}d\mathbf{y}} \quad \text{II.10}$$

Une grande surface de mode efficace est nécessaire pour les systèmes de transmission de données à haut débit (en particulier pour les télécommunications). En revanche, une EMA plus faible est recommandée pour les applications non linéaires.

### II.3.2.6. Non-linéarité

Une petite surface effective fournit une densité de puissance optique élevée pour laquelle les effets non linéaires seraient importants. La surface effective et le coefficient non linéaire du matériau de fond de la PCF et la longueur d'onde de fonctionnement sont étroitement liés à l'effet non linéaire ou non linéaire. L'équation suivante peut être utilisée pour étudier le coefficient non linéaire [49]:

$$\gamma = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{n_2}{A_{\text{eff}}}\right) \quad \text{II.11}$$

Où l'indice de réfraction non linéaire est  $n_2$ . Dans divers dispositifs et applications optiques, tels que l'amplification à large bande, le démultiplexage des canaux, la conversion des longueurs d'onde, la formation de solitons, la commutation optique et bien d'autres, les effets

non linéaires sont très avantageux. Cependant, la génération de supercontinuum (SCG) est due à des ordres de non-linéarité plus élevés.

### II.3.2.7. Perte d'épaisseur

Les PCF sont fabriqués principalement avec des matériaux transparents. La silice, un matériau transparent couramment utilisé, a été largement utilisée dans la fabrication des PCF. Jusqu'à présent, la fibre de silice était considérée comme un PCF typique. Différents types de matériaux transparents tels que la tellurite, le graphène, le ZABLAN et le TOPAS ont également gagné en popularité en raison des progrès technologiques. L'indice de réfraction est la principale caractéristique de ces matériaux. L'indice de réfraction d'un matériau peut être augmenté ou diminué en le dopant avec d'autres matériaux en fonction de l'application [49]:

$$L_s = -20 \log_{10} \frac{2W_{SMF}W_{PCF}}{W_{SMF}^2 + W_{PCF}^2} \quad \text{II. 12}$$

Où  $W_{SMF}$  et  $W_{PCF}$  sont les diamètres de champ de mode de la fibre monomode et de la PCF.

### II.3.2.8. Indice de réfraction

Les PCF sont fabriqués principalement avec des matériaux transparents. La silice, un matériau transparent couramment utilisé, a été largement utilisée dans la fabrication des PCF. Jusqu'à présent, la fibre de silice était considérée comme un PCF typique. Différents types de matériaux transparents tels que la tellurite, le graphène, le ZABLAN et le TOPAS ont également gagné en popularité en raison des progrès technologiques. L'indice de réfraction est la principale caractéristique de ces matériaux. L'indice de réfraction d'un matériau peut être augmenté ou diminué en le dopant avec d'autres matériaux en fonction de l'application [50].

## II.3.3. Capteurs à base de fibres à cristaux photoniques

Les capteurs à base de fibres à cristaux photoniques sont des dispositifs de détection optique qui tirent parti des propriétés distinctives des fibres à cristaux photoniques. Ces fibres représentent des variantes spéciales des fibres optiques, permettant d'atteindre des performances qui ne sont pas réalisables avec les fibres optiques conventionnelles, en modifiant la taille et la disposition des trous dans la gaine et/ou le cœur [51], ainsi que le spectre de transmission de la fibre [52], la biréfringence [53], le mode [54], la dispersion [55], la non-linéarité [56] et le facteur de remplissage d'air [57].

Pendant les deux dernières décennies, des études approfondies ont été menées sur les capteurs à base de PCFs pour leur utilisation dans des contextes civils et militaires [58], en particulier pour détecter divers agents nucléaires [59], biologiques [60], chimiques [61], etc.

En raison de la prolifération des applications de détection dans des domaines aussi diversifiés que la santé, la défense, la sécurité, l'automobile, l'aéronautique, le contrôle qualité, pour n'en nommer que quelques-uns, les capteurs à base de fibres à cristaux photoniques (PCF) ont connu un développement significatif ces dernières années. Les progrès dans le domaine de la photonique, en termes de compréhension des phénomènes physiques et de maîtrise des procédés de fabrication, ont considérablement amélioré leurs capacités de détection. Ceci est particulièrement notable en ce qui concerne les interactions lumière-matière, la miniaturisation des interfaces et l'intégration de systèmes micro-fluidiques. Ces avancées ont permis d'atteindre des sensibilités accrues, des limites de détection plus basses avec des temps de détection plus courts, ainsi qu'une manipulation plus aisée et des coûts de mesure réduits [21].

À ce jour, un large éventail de systèmes de détection à base de PCFs a été proposé et documentés. Dans cette situation, on peut citer :

### **II.3.3.1. Détection par utilisation d'ondes évanescentes**

En 1704, I. Newton a observé la réflexion totale atténuée d'un faisceau lumineux sur la face d'un prisme en utilisant une lentille convergente, mettant en évidence les ondes évanescentes. Cette expérience bien connue a conduit à la découverte du champ électromagnétique évanescent, qui présente des caractéristiques d'ondes de surface et se propage de manière parallèle à l'interface. L'intensité de ce champ diminue de manière exponentielle à mesure que la distance s'accroît [62].

La détection par utilisation d'ondes évanescentes est une technique couramment utilisée dans les capteurs optiques, y compris les capteurs à base de fibres à cristaux photoniques. Cette technique repose sur le phénomène d'onde évanescente, qui se produit lorsque la lumière se propage dans un milieu et qu'une petite partie de cette lumière "fuit" ou "pénètre" dans un matériau adjacent avec une décroissance exponentielle de l'intensité lumineuse avec la distance à la surface d'interface.

Dans le contexte des capteurs à fibres à cristaux photoniques, les ondes évanescentes sont utilisées pour détecter les changements dans l'environnement proche de la fibre, ce qui permet de mesurer différentes propriétés physiques, chimiques ou biologiques. La propagation de la lumière s'effectue à travers la fibre à cristaux photoniques, où le cœur de la fibre entre en contact

avec l'échantillon à surveiller, tel qu'un liquide ou un gaz. Une fraction de la lumière pénètre dans le matériau voisin à travers la paroi de la fibre, créant ainsi une région d'onde évanescente à l'interface entre les deux matériaux. Si des changements se produisent dans l'environnement proche de la fibre, tels que des variations de l'indice de réfraction, de la température, de la pression ou de la composition chimique, ces changements affecteront la propriété de l'onde évanescente. Par exemple, un changement de l'indice de réfraction de l'environnement proche de la fibre modifiera la manière dont l'onde évanescente se propage et s'atténue. En fin, et en mesurant les modifications dans l'atténuation ou la phase de l'onde évanescente, il est possible de déterminer les variations de l'environnement. Ces changements sont ensuite convertis en informations utiles pour le paramètre que le capteur est conçu pour mesurer.

Ce type de capteur est utilisé dans une variété d'applications, notamment la détection de substances chimiques [63], la surveillance de la qualité de l'eau [64], la détection d'agents biologiques [65], la mesure de la concentration de gaz [66], et bien plus encore. Les fibres à cristaux photoniques sont particulièrement adaptées à cette technique en raison de leur capacité à guider les ondes évanescentes de manière contrôlée.

### II.3.3.2. Détection par utilisation de la biréfringence

Une caractéristique très importante, Le maintien de l'état de polarisation des ondes optiques est particulièrement bénéfique pour les communications optiques cohérentes et la détection à fibres optiques. L'utilisation de fibres pour préserver l'état de polarisation des ondes pendant leur propagation est une condition essentielle pour développer un capteur basé sur le principe de la modulation de polarisation [21].

La détection par utilisation de la biréfringence est une technique optique qui repose sur les propriétés de la biréfringence dans certains matériaux. La biréfringence est le phénomène par lequel la lumière se propage à des vitesses différentes dans différentes directions à travers un matériau anisotrope, c'est-à-dire un matériau dont les propriétés optiques dépendent de la direction de propagation de la lumière. La biréfringence est souvent exploitée pour mesurer des changements dans l'environnement proche du matériau biréfringent. Le principe de la détection par utilisation de la biréfringence utilise la vitesse de la lumière qui dépend de la polarisation de la lumière et de la direction de propagation. En conséquence, la lumière polarisée linéairement se déplace à des vitesses différentes le long des deux directions principales du matériau. Si l'environnement proche du matériau biréfringent subit des changements, tels que des variations de température, de pression ou de contrainte mécanique, cela peut entraîner des modifications dans les propriétés optiques du matériau, y compris sa biréfringence. Ces

changements de biréfringence peuvent être mesurés et interprétés pour obtenir des informations sur les paramètres environnementaux. Par la suite, en mesurant les changements de biréfringence du matériau biréfringent, il est possible de déterminer les variations de l'environnement. Cela peut être réalisé en utilisant des techniques telles que la polarimétrie, qui mesure les modifications de la polarisation de la lumière après qu'elle a traversé le matériau biréfringent.

On peut utiliser ces capteurs dans une variété d'applications, notamment la détection de contraintes mécaniques, la surveillance des vibrations, la mesure de la pression [67] et de la température [68], ainsi que d'autres paramètres environnementaux. Ils sont utilisés dans des domaines tels que l'ingénierie structurale [69], l'industrie pétrolière et gazière [70], l'industrie aérospatiale [71] et plus encore.

### **II.3.3.3. Détection par utilisation de la bande interdite photonique**

Les fibres à cristaux photoniques (PCFs) se répartissent en deux grandes catégories : les fibres à cœur creux et les fibres à cœur plein. Ces fibres utilisent deux mécanismes distincts pour guider la lumière : la réflexion totale interne modifiée (RTI-m) ou le phénomène de confinement de la lumière, connu sous le nom de BIP (Bloch Induced Transparency), en fonction du principe adopté. Toutefois, il convient de noter que le mécanisme de guidage de la lumière peut être modifié de la RTI-m au guidage par l'effet du BIP si les trous d'air dans les fibres PCF à cœur plein sont infiltrés avec des solutions d'indice plus élevées que le cœur [21].

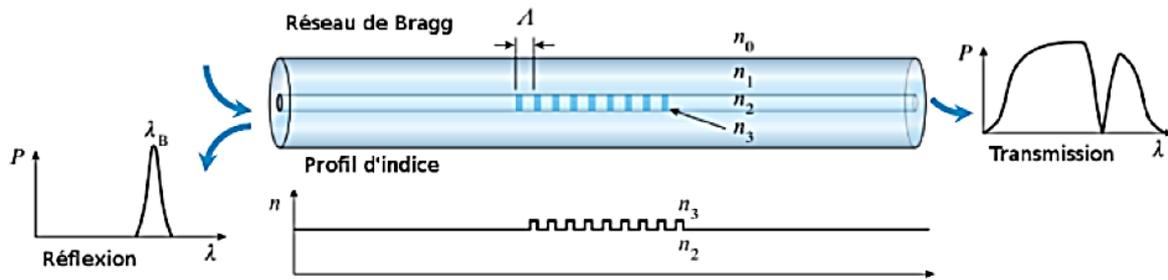
La détection par utilisation de la bande interdite photonique est une technique optique qui repose sur les propriétés des matériaux photoniques, tels que les cristaux photoniques, qui présentent une bande interdite de fréquences ou de longueurs d'onde pour lesquelles la propagation de la lumière est interdite. Cette bande interdite est également parfois appelée "gap photonique". Lorsque la lumière est incidente sur un matériau photonique qui possède une bande interdite, elle ne peut pas se propager dans cette plage de fréquences ou de longueurs d'onde spécifiques. Cependant, cette propriété peut être exploitée pour créer des capteurs optiques sensibles à diverses propriétés environnementales. Les cristaux photoniques et autres structures photoniques présentent une périodicité dans leur structure qui crée une bande interdite, empêchant la propagation de certaines fréquences ou longueurs d'onde de lumière. Cette bande interdite peut être ajustée en fonction de la géométrie et de la composition du matériau. Lorsqu'un matériau photonique avec une bande interdite est exposé à des changements dans son environnement, tels que des variations de l'indice de réfraction ou de la température, ces changements peuvent affecter la position ou la largeur de la bande interdite.

Cela peut être dû à des modifications des propriétés optiques ou structurales du matériau. En surveillant les changements dans la bande interdite photonique, il est possible de détecter et mesurer les variations de l'environnement. Cela peut être réalisé en mesurant les réflexions, les transmissions ou d'autres propriétés optiques à proximité de la bande interdite.

Les capteurs basés sur l'utilisation de la bande interdite photonique sont utilisés dans diverses applications, y compris la détection de changements de température [72], la surveillance de l'indice de réfraction de l'environnement [72], la mesure de la composition chimique [73], et d'autres paramètres qui modifient les propriétés optiques du matériau photonique.

### II.3.3.4. Détection par utilisation des réseaux de Bragg

La détection par utilisation des réseaux de Bragg est une technique optique couramment employée pour la création de capteurs sensibles à différentes propriétés environnementales, comme la température, la pression, la déformation, la tension, etc. Les réseaux de Bragg, également connus sous le nom de réseaux de diffraction, sont des structures périodiques dans les matériaux qui réfléchissent sélectivement certaines longueurs d'onde de lumière, créant ainsi des franges d'interférence qui dépendent des propriétés du milieu environnant. Ces composants optiques sont fabriqués à l'aide de diverses techniques, notamment l'irradiation par laser CO<sub>2</sub>, les décharges électriques et les ondes acoustiques [74]. Les variations périodiques créent des réflexions sélectives à des longueurs d'onde spécifiques, en exploitant le phénomène d'interférence constructive entre les ondes lumineuses réfléchies par différentes parties de la structure. Lorsque les réseaux de Bragg sont exposés à des changements dans l'environnement, tels que des variations de température, de pression, de déformation ou d'autres propriétés, ces changements peuvent influencer les propriétés de la réflexion du réseau de Bragg. Cela peut provoquer un décalage des franges d'interférence ou un changement dans la longueur d'onde de réflexion. En surveillant les variations dans les propriétés de réflexion du réseau de Bragg, il est possible de mesurer les changements environnementaux. Cela peut être réalisé en observant les modifications de l'intensité lumineuse réfléchie à une longueur d'onde spécifique. Les capteurs à réseaux de Bragg sont utilisés dans divers domaines, tels que l'industrie, la surveillance de structures, la médecine, l'aviation et plus encore. Les fibres optiques à réseaux de Bragg, également connues sous le nom de capteurs FBG (Fiber Bragg Grating), sont particulièrement populaires pour leur robustesse et leur capacité à être intégrées dans des environnements difficiles [75]. Le principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg est montré sur la figure II.11.



**Figure II. 11** Principe du réseau de Bragg [75].

Les fibres à réseaux de Bragg sont classées en deux catégories distinctes, se distinguant par leur période et la nature du couplage de la lumière :

### *1. Réseaux de Bragg à pas courts*

Les fibres à réseaux de Bragg à pas courts, également appelées "Short-Period Fiber Bragg Gratings" (SPFBG), sont des dispositifs optiques utilisés pour créer des réseaux de Bragg dans les fibres optiques. Contrairement aux réseaux de Bragg conventionnels, les réseaux de Bragg à pas courts ont une période de modulation plus courte, ce qui signifie que les variations périodiques de l'indice de réfraction sont plus fréquentes dans la fibre. Ils sont utilisés dans des domaines tels que la surveillance de structures [76], l'industrie pétrolière et gazière [77], l'aérospatiale [78], la biomédecine [79] et plus encore. Leur sensibilité élevée et leur réponse rapide les rendent utiles dans des environnements variés.

### *2. Réseaux de Bragg à pas longs*

Les réseaux de Bragg à pas longs, également appelés "Long-Period Fiber Bragg Gratings" (LPFBG), sont des dispositifs optiques utilisés pour créer des réseaux de Bragg dans les fibres optiques. Contrairement aux réseaux de Bragg traditionnels à pas courts, les réseaux de Bragg à pas longs ont une période de modulation plus longue, typiquement de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  à 1  $\mu\text{m}$  [80], ce qui signifie que les variations périodiques de l'indice de réfraction sont moins fréquentes dans la fibre. Ils sont utilisés dans des domaines où le couplage de modes et les propriétés de transmission sont cruciaux. Par exemple, ils peuvent être utilisés dans les communications optiques [81], la manipulation de spectre optique [82], et dans d'autres applications nécessitant des modifications précises des propriétés spectrales de la lumière [83].

#### **II.3.3.5. Détection par utilisation de l'interférométrie**

Le principe de cette détection repose sur l'interférence constructive et destructive des ondes lumineuses pour mesurer différentes propriétés environnementales. L'interférométrie permet d'exploiter les variations de phase et d'amplitude des ondes lumineuses pour obtenir des

informations précises sur les changements dans un système optique. Ces ondes peuvent s'additionner ou s'annuler en fonction des différences de phase entre elles. L'interférence constructive se produit lorsque les crêtes d'une onde coïncident avec les crêtes de l'autre onde, créant une intensité lumineuse plus élevée. L'interférence destructive se produit lorsque les crêtes d'une onde coïncident avec les creux de l'autre onde, réduisant l'intensité lumineuse. Il existe plusieurs types d'interférométrie, tels que l'interférométrie de Michelson [84], l'interférométrie de Fabry-Pérot [85], l'interférométrie de Mach-Zehnder [86], et l'interférométrie de Sagnac [87]. Chacun de ces types d'interférométrie utilise des configurations spécifiques pour créer des motifs d'interférence qui sont sensibles aux variations environnementales. Lorsque des variations se produisent dans l'environnement, telles que des changements de température, de pression, de déformation ou d'autres paramètres, elles peuvent influencer la phase, la fréquence ou l'amplitude des ondes lumineuses à l'intérieur de l'interféromètre. Ces changements se reflètent dans les motifs d'interférence observés. En mesurant les variations des motifs d'interférence, il est possible de déterminer les changements dans l'environnement. Cela peut être réalisé en observant les variations d'intensité lumineuse à différents points du détecteur [75, 88].

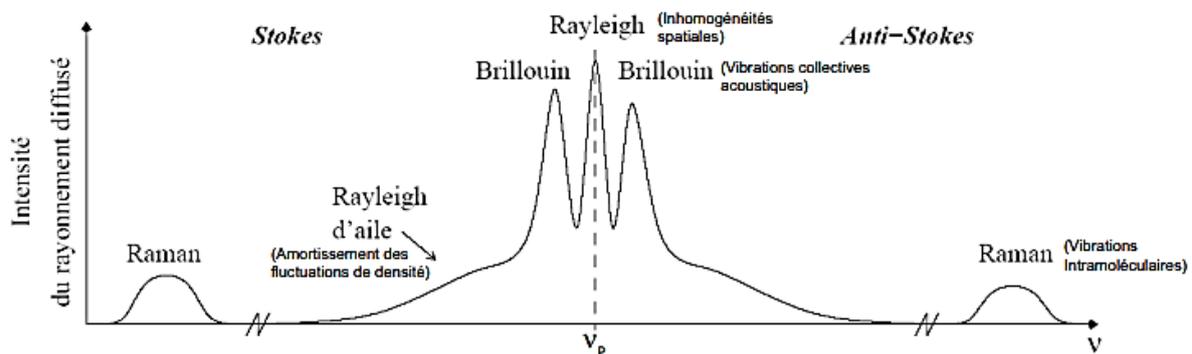
L'interférométrie est utilisée dans une variété d'applications, notamment la mesure de la longueur [89], la détection de vibrations [90], la surveillance de déformations [91], la caractérisation de surfaces [92], la mesure de la composition chimique [93] et bien plus encore. L'interférométrie est particulièrement précise et sensible, ce qui en fait une méthode largement utilisée dans la recherche scientifique et l'industrie [94].

### **II.3.3.6. Détection par utilisation de l'analyse spectrale**

Le but de cette détection est d'étudier la distribution de l'intensité lumineuse à différentes longueurs d'onde (ou fréquences) pour obtenir des informations sur les propriétés d'un système optique ou environnemental. L'analyse spectrale consiste à décomposer la lumière en ses différentes composantes spectrales, c'est-à-dire en la divisant en ses différentes longueurs d'onde ou fréquences constitutives. Cela permet d'obtenir un spectre de lumière, qui peut révéler des informations spécifiques sur la source lumineuse ou sur les interactions lumière-matière. Lorsque la lumière interagit avec un objet ou un milieu, elle peut subir des modifications de sa distribution spectrale. Ces modifications peuvent résulter de divers processus, tels que l'absorption, la diffusion, la réflexion, la dispersion, entre autres. Ces interactions dépendent des propriétés de l'objet ou du milieu. Ensuite, en analysant le spectre de la lumière émise ou réfléchi, il est possible de détecter les changements dans les propriétés de l'objet ou du milieu.

Par exemple, des pics ou des creux spécifiques dans le spectre peuvent indiquer la présence de certaines substances chimiques, la variation de température, la déformation mécanique, ou d'autres caractéristiques. Cependant, dans un milieu homogène tel que celui d'une fibre optique, la lumière se propage uniquement dans la direction de propagation du faisceau incident. On peut distinguer la diffusion Raman, la diffusion Rayleigh et la diffusion Brillouin en fonction du type de centres diffuseurs. Ensuite, l'analyse spectrale de la lumière émise par le milieu diffusé permet de détecter des raies qui s'écartent des raies de la pompe optique. Ce décalage peut être négatif ou positif et on parle respectivement des lignes Stokes et anti-Stokes [95]. La figure II.12 illustre la diffusion de Raman et de Brillouin.

L'analyse spectrale est utilisée dans de nombreuses applications, notamment en spectroscopie [96], en chimie analytique [97], en médecine [98], en contrôle qualité industriel [99]. Les techniques d'analyse spectrale, telles que la spectroscopie infrarouge [100], la spectroscopie Raman [101], la spectrométrie de masse [102], etc., permettent d'obtenir des informations précises sur la composition et les propriétés d'un échantillon.



**Figure II. 12** Diffusion Raman et Brillouin [95].

### *i Diffusion Brillouin*

La diffusion Brillouin, également connue sous le nom de diffusion Brillouin stimulée (SBS pour Stimulated Brillouin Scattering en anglais), est un phénomène optique non linéaire qui se produit lorsque de la lumière incidente interagit avec des fluctuations acoustiques dans un milieu transparent. Dans la diffusion Brillouin, l'onde lumineuse incidente stimule la création d'une onde Brillouin cohérente avec elle. L'onde Brillouin nouvellement créée interagit à son tour avec l'onde incidente, induisant ainsi une interaction de rétroaction stimulée. En raison de l'interaction avec les vibrations acoustiques, l'onde Brillouin est décalée en fréquence par rapport à l'onde incidente. Ce décalage en fréquence est directement lié à la vitesse du son dans le matériau et peut être utilisé pour mesurer des propriétés telles que la température et la

déformation mécanique. La diffusion Brillouin a une sensibilité élevée et offre une mesure directe de la température et de la déformation sans avoir besoin de capteurs physiques supplémentaires. Cependant, elle nécessite souvent des systèmes optiques sophistiqués pour l'excitation et la détection de l'effet Brillouin [95].

La diffusion Brillouin est largement utilisée dans la détection de température [103] et de contrainte mécanique [104]. En analysant le décalage en fréquence entre l'onde incidente et l'onde Brillouin, il devient possible de quantifier les changements de température ou de déformation [105] dans la fibre optique.

### *ii Diffusion Raman*

La diffusion Raman, également appelée diffusion inélastique de la lumière Raman, est un phénomène optique permettant d'acquérir des informations sur les vibrations moléculaires et les niveaux d'énergie des molécules présentes dans un échantillon. Lorsqu'un échantillon est exposé à une source de lumière, une partie de la lumière incidente est diffusée par les molécules de l'échantillon. La diffusion Raman se produit lorsque des photons de la lumière incidente interagissent avec les vibrations moléculaires de l'échantillon, modifiant leur énergie cinétique. Pendant l'interaction, une petite fraction de la lumière diffusée subit un changement d'énergie, ce qui se traduit par un décalage en fréquence (ou en longueur d'onde) par rapport à la lumière incidente. Ce décalage est spécifique aux vibrations moléculaires et permet d'identifier les types de liaisons chimiques et les groupes fonctionnels présents dans l'échantillon. En enregistrant les décalages de fréquence des photons diffusés, on obtient un spectre Raman qui représente les différentes vibrations moléculaires de l'échantillon. Chaque pic dans le spectre Raman correspond à une vibration spécifique, ce qui permet d'identifier les composants chimiques et de déterminer leur structure [95].

La diffusion Raman est utilisée dans divers domaines, tels que la chimie [106], la biologie [107], la science des matériaux [108], la géologie [109] et autres. Elle permet l'analyse non destructive des échantillons, sans nécessiter de préparation complexe.

### **II.3.3.7. Détection par utilisation des plasmons de surface**

Ce phénomène consiste à exploiter les propriétés des plasmons de surface pour détecter des changements dans l'environnement proche d'une surface métallique ou d'un matériau plasmonique. Les plasmons de surface sont des oscillations collectives des électrons de conduction à la surface d'un matériau conducteur, tels que les métaux, qui sont excités par la lumière incidente. Ces plasmons peuvent être excités par la lumière incidente et se propager sur

des distances très courtes le long de la surface. Lorsque les plasmons de surface interagissent avec l'environnement proche, tels que des molécules adsorbées, des changements dans l'indice de réfraction, des molécules cibles spécifiques ou d'autres variations, cela peut modifier les propriétés des plasmons de surface. Ces modifications peuvent être détectées en observant les changements dans les caractéristiques optiques, telles que l'absorption, la réflexion ou la diffusion de la lumière. La détection des changements dans les propriétés des plasmons de surface permet de détecter les interactions entre les plasmons et l'environnement. Ces changements sont souvent observables sous forme de pics de résonance dans le spectre d'absorption ou de réflexion, qui se déplacent ou changent d'intensité en réponse aux variations environnementales [88, 110].

Les travaux de B. Liedberg et C. Nylander remontent aux années 80 [111], marquant l'utilisation pionnière de la résonance des plasmons de surface (SPR) à des fins de détection. À cette époque, la configuration de Kretschmann-Raether a été employée pour la première fois afin de détecter les gaz et les biomolécules [112].

Depuis, les plasmons de surface sont aussi utilisés dans la détection de molécules spécifiques [113], tels que les capteurs de biodétection comme l'ADN [114], le glucose [115] et la protéine [116]. Ils sont également utilisés dans la caractérisation de couches minces [117], et d'autres applications sensibles à l'interaction avec l'environnement [118] et la sécurité alimentaire [119].

### II.3.4. Avantage des capteurs à base des fibres à cristaux photoniques

En variant la structure du PCF (hexagonale, octogonale, décagonale, etc.) et en variant également la taille du noyau structural et de la gaine avec différents arrangements, la propagation de la lumière peut être adaptée de manière significative. Pour les capteurs basés sur les PCF, le champ évanescent est l'élément clé. Grâce à la capacité de contrôle de la lumière des PCF, le champ évanescent peut être adapté de manière intensive, ce qui permet d'améliorer considérablement les performances du capteur. Parmi les différents avantages des PCF, on peut citer [120]:

- Immunité aux interférences électromagnétiques : Contrairement aux capteurs électriques, les capteurs à base de fibres à cristaux photoniques sont insensibles aux interférences électromagnétiques, ce qui les rend utiles dans des environnements électromagnétiquement perturbés.

- Sensibilité accrue : En fonctionnant avec des propriétés de guidage d'ondes spécifiques, les capteurs à fibres à cristaux photoniques peuvent être conçus pour être très sensibles à certains paramètres, tels que la température, la pression, la composition chimique ou même la biochimie. Peut être utilisé pour des mesures mécaniques, électriques, magnétiques, chimiques et biologiques, etc.
- L'utilisations dans des environnements soumis à des vibrations extrêmes et à des conditions difficiles. Ils peuvent résister à des températures élevées (plus de 1450°C) et à des environnements corrosifs.
- Multiparamétriques : Les capteurs à fibres à cristaux photoniques peuvent être conçus pour être multiparamétriques, ce qui signifie qu'ils peuvent mesurer plusieurs propriétés en même temps, comme la température et la pression, en utilisant une seule fibre. Ils sont très sensibles et permettent de mesurer des variations très petites et offrent une largeur de bande et une plage dynamique étendues.
- Compact et flexible : En raison de leur conception basée sur des fibres, les capteurs à cristaux photoniques peuvent être fabriqués de manière compacte et flexible. Ils peuvent être intégrés dans des environnements et des dispositifs complexes sans prendre beaucoup d'espace.

### II.3.5. Aperçu des capteurs physiques a base fibres à cristaux photoniques

Les propriétés optiques uniques des PCF leur ont permis de trouver un grand nombre d'applications potentielles. Les capteurs à base des PCF ont de nombreuses applications, dont certaines sont énumérées ci-dessous :

#### II.3.5.1. Capteur de température

La mesure de la température est intéressante dans l'industrie et la surveillance de la santé environnementale. Le mécanisme conventionnel de mesure de la température n'est pas adapté. Les capteurs de température à base de PCF sont les plus populaires pour la détection de la température en raison de leurs capacités de détection simples et rentables. À ce jour, plusieurs capteurs de température à base de PCF ont été rapportés [121-123].

Le principe est basé sur la variations périodiques de l'indice de réfraction dans leur cœur. Ces variations créent une bande interdite photonique dans laquelle certaines longueurs d'onde de lumière sont interdites de propagation. La position de cette bande interdite dépend de paramètres tels que la période de modulation, le matériau de la fibre et la température. Lorsque la température change, les propriétés physiques du matériau de la fibre à cristaux photoniques,

comme l'indice de réfraction, peuvent également changer. Cela entraîne un déplacement de la position de la bande interdite. En surveillant ce changement de position, il est possible de mesurer avec précision les variations de température. Les capteurs de température à base de fibres à cristaux photoniques sont conçus en choisissant soigneusement les paramètres de la fibre, tels que la période de modulation et le matériau, pour obtenir une sensibilité optimale à la température. Les capteurs de température à base de fibres à cristaux photoniques offrent une sensibilité élevée, une faible sensibilité aux perturbations électromagnétiques, une réponse rapide, une résolution précise et une bonne stabilité à long terme. Ils peuvent être utilisés dans des environnements difficiles et sont adaptés à diverses applications industrielles et scientifiques [124].

### II.3.5.2. Capteur de gaz

Les gaz sont incolores et peuvent être toxiques. Mais chaque gaz présente une ligne d'absorption différente en fonction de la longueur de son spectre d'absorption et de son indice de réfraction. La PCF a été utilisée pour détecter ces gaz incolores [43]. Le capteur de gaz basé sur le PCF est capable de détecter le CO, communément appelé "tueur silencieux" [125].

Les capteurs de gaz à base de fibres à cristaux photoniques exploitent les interactions spécifiques entre les fibres et les gaz cibles pour détecter et mesurer la présence et la concentration de gaz dans diverses applications, telles que la détection de gaz toxiques, la surveillance de la qualité de l'air, la détection de gaz industriels [126], la surveillance de l'environnement [127]. Ces interactions peuvent être basées sur des phénomènes tels que l'absorption, la réfraction ou la réflectivité des gaz cibles.

### II.3.5.3. Capteur de fluide

Les capteurs de fluide à base de fibres à cristaux photoniques sont des dispositifs optiques conçus pour détecter et surveiller les propriétés des fluides en utilisant les changements dans les propriétés optiques des fibres à cristaux photoniques en réponse aux variations de composition, de densité, de viscosité ou d'autres caractéristiques des fluides. Ces propriétés optiques de la fibre à cristaux photoniques peuvent être influencées par l'interaction avec le fluide environnant [128]. Par exemple, des changements dans la densité, l'indice de réfraction, la viscosité ou d'autres propriétés du fluide peuvent modifier les propriétés optiques de la fibre. Les capteurs de fluide à base de fibres à cristaux photoniques sont conçus en intégrant des parties de la fibre à cristaux photoniques en contact avec le fluide à surveiller. Les propriétés optiques de la fibre, telles que la longueur d'onde de réflexion ou de transmission, peuvent changer en fonction des propriétés du fluide. Pour mesurer les changements dans les propriétés

optiques de la fibre à cristaux photoniques en réponse au fluide, une source de lumière est injectée dans la fibre, et la lumière réfléchiée ou transmise est analysée. Les variations de propriétés du fluide entraînent des changements dans les caractéristiques optiques du capteur.

Les capteurs de fluide à base de fibres à cristaux photoniques sont utilisés dans une variété d'applications, telles que la surveillance des liquides industriels [129], la détection de fuites [130], la surveillance de la qualité de l'eau [131], la caractérisation des propriétés des fluides biologiques [132], et bien d'autres. Ils sont particulièrement utiles lorsque la surveillance en temps réel et la mesure précise des propriétés des fluides sont nécessaires.

### II.3.5.4. Capteur chimique

Les produits chimiques sont massivement utilisés dans les applications industrielles. Dans certains cas, il est nécessaire de détecter certains produits chimiques indésirables qui sont toxiques pour le corps humain. En fonction de la structure interne du produit chimique, leur indice de réfraction est également différent. Chaque produit chimique a son propre indice de réfraction, comme le benzène ( $n=1,366$ ), l'éthanol ( $n=1,354$ ) et l'eau ( $n=1,33$ ). En fonction de ces indices de réfraction, les produits chimiques peuvent être détectés par le PCF en les faisant passer par la région centrale [125].

Les fibres à cristaux photoniques sont modifiées pour interagir de manière spécifique avec certaines substances chimiques cibles. Cela peut être réalisé en modifiant la surface de la fibre pour y fixer des molécules spécifiques (récepteurs) qui ont une affinité pour les substances chimiques à détecter. Lorsque les molécules cibles entrent en contact avec les récepteurs fixés sur la fibre, des interactions chimiques spécifiques se produisent. Ces interactions peuvent induire des changements dans les propriétés optiques de la fibre, tels que des changements de l'indice de réfraction ou de la bande interdite photonique.

Les capteurs chimiques à base de fibres à cristaux photoniques sont utilisés pour détecter et quantifier des substances chimiques spécifiques dans divers domaines, tels que la surveillance de l'environnement [133], la détection de gaz toxiques [134], la sécurité alimentaire [135], la détection de substances médicamenteuses [136].

### II.3.5.5. Capteur de pression

La pression est un comportement courant dans les cas de produits chimiques gazeux et liquides. En outre, les changements révolutionnaires dans le domaine optique ont permis au capteur de pression basé sur le PCF de jouer un rôle important en mesurant la pression à l'intérieur du corps du patient, en particulier pour l'évaluation urodynamique et cardiovasculaire [137].

Les fibres à cristaux photoniques sont modifiées ou conçues de manière à ce que la pression environnante puisse influencer les propriétés optiques du matériau de la fibre. Les variations de pression induisent des changements dans les propriétés optiques, tels que la bande interdite photonique ou la longueur d'onde de réflexion.

Les capteurs de pression à base de fibres à cristaux photoniques sont conçus en intégrant des parties spécifiques de la fibre à cristaux photoniques qui sont sensibles aux variations de pression. Ces parties de la fibre peuvent être exposées à la pression ou en contact avec un élément qui transmet la pression à la fibre. Une source de lumière est injectée dans la fibre à cristaux photoniques, et la lumière réfléchie ou transmise est analysée. Les variations de pression modifient les propriétés optiques de la fibre, ce qui se traduit par des changements dans les caractéristiques optiques du capteur, tels que les décalages de longueur d'onde.

Les capteurs de pression à base de fibres à cristaux photoniques sont utilisés dans diverses applications, telles que la surveillance de la pression dans les systèmes industriels [138], la surveillance de la pression artérielle en médecine [139], la mesure de la pression dans les systèmes hydrauliques [139], la surveillance des pipelines [140], etc.

### II.3.5.6. Capteur de déplacement

Les capteurs de déplacement à base de fibres à cristaux photoniques exploitent les propriétés optiques uniques de ces fibres pour mesurer les variations de déplacement ou de position. Une source de lumière est injectée dans la fibre à cristaux photoniques, et la lumière réfléchie ou transmise est analysée. Les variations de déplacement modifient les propriétés optiques de la fibre, ce qui se traduit par des changements dans les caractéristiques optiques du capteur, tels que les décalages de longueur d'onde. Ces capteurs sont utilisés dans diverses applications où la sensibilité, la résolution et la fiabilité sont essentielles. Les capteurs de déplacement à base de fibres à cristaux photoniques sont conçus en intégrant des parties de la fibre sensibles aux variations de déplacement. Cela peut impliquer des modifications de la fibre elle-même ou l'ajout d'éléments qui amplifient le changement dans les propriétés optiques [141].

Les capteurs de déplacement à base de fibres à cristaux photoniques sont utilisés dans une variété d'applications, telles que la mesure de déplacement dans les structures [142], la détection de vibrations [143], la surveillance des mouvements dans la robotique [144], la mesure de déplacement microscopique [145], etc.

### II.3.5.7. Capteur mécanique

Les fibres à cristaux photoniques sont conçues pour interagir avec les contraintes mécaniques. Lorsqu'une sollicitation mécanique, telle que la déformation ou la flexion, est appliquée sur la fibre, les propriétés physiques du matériau de la fibre peuvent changer, ce qui entraîne des modifications des propriétés optiques, telles que la bande interdite photonique. Les capteurs mécaniques à base de fibres à cristaux photoniques sont conçus en intégrant des parties spécifiques de la fibre qui sont sensibles aux contraintes mécaniques. Ces parties peuvent être exposées aux contraintes mécaniques ou en contact avec des éléments qui transmettent les sollicitations à la fibre [146].

Les capteurs mécaniques à base de fibres à cristaux photoniques sont utilisés dans diverses applications, telles que la surveillance de la déformation dans les structures [147], la mesure de la tension dans les câbles [148], la surveillance des contraintes dans les matériaux [149], la mesure de la pression mécanique [150].

## II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous introduisons les capteurs à fibre optique ainsi que leurs propriétés, en fournissant une description qualitative des phénomènes optiques exploités pour mesurer divers phénomènes physiques, chimiques et biologiques. Nous mettons en avant leur importance relative par rapport aux capteurs électriques. Une attention particulière est accordée au capteur à fibre à cristal photonique.

Les capteurs à fibres microstructurées sont des dispositifs optiques avancés qui utilisent des cristaux photoniques dans des fibres optiques pour détecter avec précision et sensibilité diverses grandeurs physiques. Leur robustesse et leur fiabilité en font une option attrayante pour de nombreuses applications nécessitant une mesure précise et stable dans des environnements variés. L'intérêt croissant pour les capteurs à FCP réside dans leur capacité à détecter des changements minimes dans l'indice de réfraction, ce qui les rend extrêmement sensibles à de petites variations dans leur environnement. Le principe de fonctionnement repose sur l'interaction entre la lumière propagée dans la fibre et les propriétés optiques des cristaux photoniques. Lorsque l'indice de réfraction local change, cela perturbe les propriétés de résonance optique, générant ainsi des signaux mesurables.

Par la suite, notre attention se portera sur l'amélioration de la sensibilité des capteurs à base de fibres à cristaux photoniques, en mettant l'accent sur la détection de la pression, ainsi que sur la détection biochimique de pathologies telles que la malaria, le glucose et la salinité.

### Références

- [1] J. L. Santos F. Farahi, "Handbook of optical sensors", 2014.
- [2] Y. Sanogo, "Conception et fabrication de capteurs et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la santé et de l'environnement", thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2012.
- [3] S. Amoudache, "Cristaux phoxoniques accordables; application au domaine des capteurs", thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [4] G. Asch, "Les capteurs en instrumentation industrielle-7ème édition", 2010.
- [5] G. Asch B. Poussery, "Les capteurs en instrumentation industrielle-8e éd", 2017.
- [6] S. Olyae, H. Mohsenirad, A. Mohebzadeh-Bahabady W. Wang, "Photonic crystal chemical/biochemical sensors", J Progresses in Chemical Sensor, 3, 2016.
- [7] G. Asch, "coll., Les capteurs en instrumentation industrielle", J Ed. Dunod, 2006.
- [8] L. Winterhalter, B. Mistele U. Schmidhalter, "Evaluation of active and passive sensor systems in the field to phenotype maize hybrids with high-throughput", J Field Crops Research, 154, 236-245, 2013.
- [9] O. Français, "Capteurs et électronique Associée", J Chapitre, 2000.
- [10] C. Dejous, "Capteurs acoustiques à modes de plaque transverses horizontaux: application à la détection en milieux liquides et gazeux", thèse de doctorat, Bordeaux 1, 1994.
- [11] D. Mouloud C. Ilyas, "Conception et réalisation d'un système automatique de mesure gaz avec la compensation des grandeurs d'influence", Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [12] P. Vasseur, "Etude de faisabilité d'un capteur intelligent de déplacement à courants de Foucault", thèse de doctorat, Reims, 1991.
- [13] T. N. Do Y. Visell, "Stretchable, twisted conductive microtubules for wearable computing, robotics, electronics, and healthcare", J Scientific reports, 7, 1753, 2017.
- [14] K. Fidanboylu H. Efendioglu, "Fiber optic sensors and their applications", 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09), 2009.
- [15] S. Gong, W. Schwalb, Y. Wang, Y. Chen, Y. Tang, J. Si, B. Shirinzadeh W. Cheng, "A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires", J Nature communications, 5, 3132, 2014.
- [16] S. A. Morin, R. F. Shepherd, S. W. Kwok, A. A. Stokes, A. Nemiroski G. M. Whitesides, "Camouflage and display for soft machines", J Science, 337, 828-832, 2012.

- [17] S. Xu, Y. Zhang, L. Jia, K. E. Mathewson, K.-I. Jang, J. Kim, H. Fu, X. Huang, P. ChavaR. Wang, "Soft microfluidic assemblies of sensors, circuits, and radios for the skin", *J Science*, 344, 70-74, 2014.
- [18] J. C. YeoC. T. Lim, "Emerging flexible and wearable physical sensing platforms for healthcare and biomedical applications", *J Microsystems Nanoengineering*, 2, 1-19, 2016.
- [19] S. Yin, P. B. RuffinT. Francis, "Fiber optic sensors", 2017.
- [20] M. T. Souici, "Etude et conception d'un capteur d'ondes acoustiques en milieu sous-marin à base de laser à fibre dopée", thèse de doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2014.
- [21] R. BOUFENAR, "Amélioration de la Sensibilité des Capteurs par l'utilisation des Fibres à Cristaux Photoniques", thèse de doctorat, Université de M'sila,
- [22] B. D. Gupta, "Fiber optic sensors: principles and applications", 2006.
- [23] Y. S. Mamdem, "Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin: séparation de la dépendance à température et à la déformation", Thèse de doctorat, Télécom ParisTech, 2012.
- [24] C. K. KirkendallA. Dandridge, "Overview of high performance fibre-optic sensing", *J Journal of Physics D: Applied Physics*, 37, R197, 2004.
- [25] R. C. Youngquist, S. CarrD. E. Davies, "Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique", *J Optics letters*, 12, 158-160, 1987.
- [26] M. Guilhem, "Conception et optimisation d'un capteur piezo-optique de pression, application à la mesure de hautes pressions hydrostatiques Langue Anglais", thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 2010.
- [27] V. K. Rai, "Temperature sensors and optical sensors", *J Applied Physics B*, 88, 297-303, 2007.
- [28] M. Ramasubramanian, R. A. Venditti, C. AmmineniV. Mallapragada, "Optical sensor for noncontact measurement of lignin content in high-speed moving paper surfaces", *J IEEE Sensors Journal*, 5, 1132-1139, 2005.
- [29] L. O. TizianiF. L. Hammond, "Optical sensor-embedded pneumatic artificial muscle for position and force estimation", *J Soft robotics*, 7, 462-477, 2020.
- [30] A. RussellK. Fletcher, "Optical sensor for the determination of moisture", *J Analytica Chimica Acta*, 170, 209-216, 1985.
- [31] R. J. McNicholsG. L. Cote, "Optical glucose sensing in biological fluids: an overview", *J Journal of biomedical optics*, 5, 5-16, 2000.

- [32] P. Ferdinand, "Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg", *J Techniques de l'ingénieur*, 6735, 1-24, 1999.
- [33] T. Bae, R. A. Atkins, H. F. Taylor, W. N. Gibler, "Interferometric fiber-optic sensor embedded in a spark plug for in-cylinder pressure measurement in engines", *J Applied optics*, 42, 1003-1007, 2003.
- [34] D. Inaudi, B. Glisic, "Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing", *J. Pressure Vessel Technol*, 2010.
- [35] D. Inaudi, B. Glisic, "Overview of fibre optic sensing applications to structural health monitoring", *Symposium on Deformation Measurement and Analysis*, 2008.
- [36] Y. Hayakawa, "Temperature monitoring solution using DTSX200 fiber optic distributed temperature sensor", *Yokogawa Technical Report English Edition*, 57, 2014.
- [37] I. Kurek, T. Castelain, P. Lecomte, E. Jondeau, C. Bailly, "MESURE DE DENSITE EN ECOULEMENT PAR DIFFUSION DE RAYLEIGH: METHODE DE CALIBRATION PAR POLARISATION DU FAISCEAU INCIDENT", *17ème Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL) 2022*, 2022.
- [38] L. Cecchi, R. Vacher, L. Danyach, "Mesure des constantes élastiques du quartz par diffusion Brillouin", *J Journal de Physique*, 31, 501-506, 1970.
- [39] S. Dufort, "Mesures de températures sous choc par diffusion Raman", *J de Physique Colloques*, 48, C4-137-C4-144, 1987.
- [40] Q. Bai, Q. Wang, D. Wang, Y. Wang, Y. Gao, H. Zhang, M. Zhang, B. Jin, "Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry", *J Sensors*, 19, 1862, 2019.
- [41] Y. Feng, W. Xie, Y. Meng, L. Zhang, Z. Liu, W. Wei, Y. Dong, "High-performance optical frequency-domain reflectometry based on high-order optical phase-locking-assisted chirp optimization", *J of Lightwave Technology*, 38, 6227-6236, 2020.
- [42] S. Asaduzzaman, B. K. Paul, K. Ahmed, "Enhancement of sensitivity and birefringence of a gas sensor on micro-core based photonic crystal fiber", *2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, IEEE, 2016.
- [43] S. Asaduzzaman, K. Ahmed, "Proposal of a gas sensor with high sensitivity, birefringence and nonlinearity for air pollution monitoring", *J Sensing Bio-Sensing Research*, 10, 20-26, 2016.
- [44] C. Markos, J. C. Travers, A. Abdolvand, B. J. Eggleton, O. Bang, "Hybrid photonic-crystal fiber", *J Reviews of Modern Physics*, 89, 045003, 2017.

- [45] M. De, R. K. Gangwar, V. K. Singh, "Designing of highly birefringence, dispersion shifted decagonal photonic crystal fiber with low confinement loss", *J Photonics Nanostructures-Fundamentals Applications*, 26, 15-23, 2017.
- [46] X. Lu, Y. Liu, X. Guo, "Modular interference characteristics and beat length of a two-hole photonic crystal fiber", *Optical Measurement Technology and Instrumentation*, SPIE, 2016.
- [47] M. R. Hasan, M. A. Islam, A. A. Rifat, "A single mode porous-core square lattice photonic crystal fiber for THz wave propagation", *J Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 12, 1-8, 2016.
- [48] L. Ramezani, B. Karney, A. Malekpour, "Encouraging effective air management in water pipelines: A critical review", *J Journal of Water Resources Planning Management*, 142, 04016055, 2016.
- [49] R. A. Aoni, R. Ahmed, M. M. Alam, S. Razzak, "Optimum design of a nearly zero ultra-flattened dispersion with lower confinement loss photonic crystal fibers for communication systems", *J Int. J. Sci. Eng. Res*, 4, 1-4, 2013.
- [50] R. A. Aoni, K. Ahmed, S. Asaduzzaman, B. K. Paul, R. Ahmed, "Development of Photonic Crystal Fiber-Based Gas", *J Chemical Sensors. Comput. Photonic Sens*, 287-317, 2018.
- [51] S. Biswas, R. S. Rafi, M. A. Al-Amin, S. Alam, "Analysis of the effect of air hole diameter and lattice pitch in optical properties for hexagonal photonic crystal fiber", *J Optics Photonics Journal*, 5, 227, 2015.
- [52] K. Morishita, Y. Miyake, "Fabrication and resonance wavelengths of long-period gratings written in a pure-silica photonic crystal fiber by the glass structure change", *J Journal of Lightwave Technology*, 22, 625, 2004.
- [53] M. Pang, L. Xiao, W. Jin, A. Cerqueira, "Birefringence of hybrid PCF and its sensitivity to strain and temperature", *J Journal of Lightwave Technology*, 30, 1422-1432, 2012.
- [54] Z. Zhang, Y. Shi, B. Bian, J. Lu, "Dependence of leaky mode coupling on loss in photonic crystal fiber with hybrid cladding", *J Optics Express*, 16, 1915-1922, 2008.
- [55] X. Zhao, G. Zhou, S. Li, Z. Liu, D. Wei, Z. Hou, L. Hou, "Photonic crystal fiber for dispersion compensation", *J Applied optics*, 47, 5190-5196, 2008.
- [56] F. Arteaga-Sierra, A. Antikainen, G. P. Agrawal, "Soliton dynamics in photonic-crystal fibers with frequency-dependent Kerr nonlinearity", *J Physical Review A*, 98, 013830, 2018.

- [57] L. Jaroszewicz, M. Murawski, T. Nasilowski, K. Stasiewicz, P. Maré, M. SzymańskiP. Mergo, "Methodology of splicing large air filling factor suspended core photonic crystal fibres", *J Opto-Electronics Review*, 19, 256-259, 2011.
- [58] R. DeSalvo, C. Middleton, E. Grafer, A. Cramer, K. Anzalone, E. SotoB. Devenport, "The convergence of microwave photonic and optical wireless systems with military communication and sensor systems", 2016 IEEE Photonics Conference (IPC), IEEE, 2016.
- [59] B. Brichard, "On the use of optical fibre sensors in nuclear environment; Utilisation des capteurs a fibre optique en environnement nucleaire", *J REE. Revue de l'Electricite et de l'Electronique*, 2010.
- [60] V. N. Konopsky, T. Karakouz, E. V. Alieva, C. Vicario, S. K. SekatskiiG. Dietler, "Photonic crystal biosensor based on optical surface waves", *J Sensors*, 13, 2566-2578, 2013.
- [61] S. Asaduzzaman, K. Ahmed, T. BhuiyanT. Farah, "Hybrid photonic crystal fiber in chemical sensing", *J SpringerPlus*, 5, 1-11, 2016.
- [62] D. CourjonC. Bainier, "Le champ proche optique: Théorie et applications", 2001.
- [63] J. Park, J. KobelkeK. Oh, "Photonic crystal fiber with ring-core hollow-defect for evanescent wave chemical sensing", 2009 35th European Conference on Optical Communication, IEEE, 2009.
- [64] K. Azil, K. FerriaS. Bouzid, "Cladless optical fiber sensor based on evanescent wave absorption for monitoring methylene blue induced water pollution", *J JOSA B*, 37, A253-A258, 2020.
- [65] J. B. Jensen, L. H. Pedersen, P. E. Hoiby, L. B. Nielsen, T. P. Hansen, J. R. Folkenberg, J. Riishede, D. Noordegraaf, K. NielsenA. Carlsen, "Photonic crystal fiber based evanescent-wave sensor for detection of biomolecules in aqueous solutions", *J Optics letters*, 29, 1974-1976, 2004.
- [66] Q. Wang, D. Wu, L. Bai, W. HouY. Zhao, "Improved sensitivity of a photonic crystal fiber evanescent-wave gas sensor", *J Instrumentation science technology*, 41, 202-211, 2013.
- [67] N. Ayyanar, D. Vigneswaran, M. Sharma, M. Sumathi, M. M. RajanS. Konar, "Hydrostatic pressure sensor using high birefringence photonic crystal fibers", *J IEEE Sensors Journal*, 17, 650-656, 2016.

- [68] R. Boufenar, M. Bouamar, A. Hocini, "Numerical analysis of highly birefringent photonic crystal fiber for temperature sensing application", *J Photonics Nanostructures-Fundamentals Applications*, 24, 47-52, 2017.
- [69] C. McCague, M. Fabian, M. Karimi, M. Bravo, L. R. Jaroszewicz, P. Mergo, T. Sun, K. T. Grattan, "Novel sensor design using photonic crystal fibres for monitoring the onset of corrosion in reinforced concrete structures", *J Journal of Lightwave Technology*, 32, 891-896, 2014.
- [70] B. Huang, Y. Wang, C. Mao, "Temperature-independent gas pressure sensor with high birefringence photonic crystal fiber-based reflective Lyot filter", *J Sensors*, 19, 5312, 2019.
- [71] O. Frazao, J. Baptista, J. Santos, "Temperature-independent strain sensor based on a Hi-Bi photonic crystal fiber loop mirror", *J IEEE Sensors Journal*, 7, 1453-1455, 2007.
- [72] H. Wang, A. Yang, "Temperature sensing property of hollow-core photonic bandgap fiber filled with CdSe/ZnS quantum dots in an UV curing adhesive", *J Optical Fiber Technology*, 38, 104-107, 2017.
- [73] M. Skorobogatiy, "Microstructured and photonic bandgap fibers for applications in the resonant bio-and chemical sensors", *J Journal of Sensors*, 2009, 2009.
- [74] F. Berghmans, T. Geernaert, T. Baghdasaryan, H. Thienpont, "Challenges in the fabrication of fibre Bragg gratings in silica and polymer microstructured optical fibres", *J Laser Photonics Reviews*, 8, 27-52, 2014.
- [75] P. Lecoy, "Les fibres optiques en capteurs et en instrumentation", *J La Revue 3 E. I.*, 2016.
- [76] C. Sonnenfeld, G. Luyckx, S. Sulejmani, T. Geernaert, S. Eve, F. Berghmans, M. Gomina, "Internal strain Monitoring of composite materials with microstructured optical fiber Bragg grating sensors", *DEStech Publications, Inc.*, 87-94, 2015.
- [77] G. Yan, A. P. Zhang, G. Ma, B. Wang, B. Kim, J. Im, S. He, Y. Chung, "Fiber-optic acetylene gas sensor based on microstructured optical fiber Bragg gratings", *J IEEE Photonics Technology Letters*, 23, 1588-1590, 2011.
- [78] A. Ezbiri, S. Kanellopoulos, V. Handerek, "High resolution instrumentation system for fibre-Bragg grating aerospace sensors", *J Optics Communications*, 150, 43-48, 1998.
- [79] Z. Liu, H.-Y. Tam, "Industrial and medical applications of fiber Bragg gratings", *J Chinese Optics Letters*, 14, 120007, 2016.
- [80] J. Ju, W. Jin, "Long period gratings in photonic crystal fibers", *J Photonic Sensors*, 2, 65-70, 2012.

- [81] P. Sehgal, H. Dua, "A review on optical fiber long period grating, its applications in optical communication system", *J International Journal of Advanced Research in Computer Communication Engineering*, 4, 624-630, 2015.
- [82] W. Shin, Y. L. Lee, B.-A. Yu, Y.-C. Noh, K. Oh, "Spectral characterization of helicoidal long-period fiber gratings in photonic crystal fibers", *J Optics Communications*, 282, 3456-3459, 2009.
- [83] L. Rindorf, J. B. Jensen, M. Dufva, L. H. Pedersen, P. E. Høiby, O. Bang, "Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing", *J Optics Express*, 14, 8224-8231, 2006.
- [84] M. Shao, H. Sun, J. Liang, L. Han, D. Feng, "In-fiber Michelson interferometer in photonic crystal fiber for humidity measurement", *J IEEE Sensors Journal*, 21, 1561-1567, 2020.
- [85] M. Quan, J. Tian, Y. Yao, "Ultra-high sensitivity Fabry–Perot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and Vernier effect", *J Optics letters*, 40, 4891-4894, 2015.
- [86] J.-N. Wang, J.-L. Tang, "Photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing", *J Sensors*, 12, 2983-2995, 2012.
- [87] O. Frazão, J. M. Baptista, J. L. Santos, P. Roy, "Curvature sensor using a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric hole regions in a Sagnac interferometer", *J Applied optics*, 47, 2520-2523, 2008.
- [88] V. Portosi, D. Laneve, M. C. Falconi, F. Prudenzi, "Advances on photonic crystal fiber sensors and applications", *J Sensors*, 19, 1892, 2019.
- [89] X. Bai, D. Fan, S. Wang, S. Pu, X. Zeng, "Strain sensor based on fiber ring cavity laser with photonic crystal fiber in-line Mach–Zehnder interferometer", *J IEEE Photonics Journal*, 6, 1-8, 2014.
- [90] S. Wu, L. Wang, X. Chen, B. Zhou, "Flexible optical fiber Fabry–Perot interferometer based acoustic and mechanical vibration sensor", *J Journal of Lightwave Technology*, 36, 2216-2221, 2018.
- [91] O. Frazao, C. Jesus, J. M. Baptista, J. L. Santos, P. Roy, "Fiber-optic interferometric torsion sensor based on a two-LP-mode operation in birefringent fiber", *J IEEE Photonics Technology Letters*, 21, 1277-1279, 2009.
- [92] B. H. Lee, Y. H. Kim, K. S. Park, J. B. Eom, M. J. Kim, B. S. Rho, H. Y. Choi, "Interferometric fiber optic sensors", *J Sensors*, 12, 2467-2486, 2012.

- [93] G. Meltz, "Overview of fiber grating-based sensors", *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors VI*, SPIE, 1996.
- [94] U. SharmaX. Wei, "Fiber optic interferometric devices", Springer, 29-53, 2013.
- [95] J.-C. Beugnot, "La diffusion Brillouin dans les fibres optiques microstructurées", thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2007.
- [96] A. K. ShakyaS. Singh, "Design of novel Penta core PCF SPR RI sensor based on fusion of IMD and EMD techniques for analysis of water and transformer oil", *J Measurement*, 188, 110513, 2022.
- [97] D. Yan, J. r. PoppT. Frosch, "Analysis of fiber-enhanced Raman gas sensing based on Raman chemical imaging", *J Analytical chemistry*, 89, 12269-12275, 2017.
- [98] C.-H. Hage, "Sources optiques fibrées pour applications biomédicales", thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2013.
- [99] D. J. J. Hu, G. Humbert, H. Dong, H. Zhang, J. HaoQ. Sun, "Review of specialty fiber based Brillouin optical time domain analysis technology", *Photonics*, MDPI, 2021.
- [100] A. K. ShakyaS. Singh, "Design of dual polarized tetra core PCF based plasmonic RI sensor for visible-IR spectrum", *J Optics Communications*, 478, 126372, 2021.
- [101] A. V. Markin, N. E. MarkinaI. Y. Goryacheva, "Raman spectroscopy based analysis inside photonic-crystal fibers", *J TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 88, 185-197, 2017.
- [102] J. P. Violi, D. P. Bishop, M. P. Padula, J. R. SteeleK. J. Rodgers, "Considerations for amino acid analysis by liquid chromatography-tandem mass spectrometry: A tutorial review", *J TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 131, 116018, 2020.
- [103] P. Xu, Y. Dong, D. Zhou, C. Fu, J. Zhang, H. Zhang, Z. Lu, L. ChenX. Bao, "1200° C high-temperature distributed optical fiber sensing using Brillouin optical time domain analysis", *J Applied optics*, 55, 5471-5478, 2016.
- [104] Y. Bao, "Novel applications of pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis for behavior evaluation of structures under thermal and mechanical loading", 2017.
- [105] C. Sabatier, "Toward the temperature and strain discrimination by Brillouin based distributed fiber sensor", Thèse de doctorat, Lyon, 2019.
- [106] M. Avignon, C. Garrigou-LagrangeP. Bothorel, "Analyse conformationnelle des dipeptides en solution aqueuse-I.—Étude d'une série d'amides modèles par diffusion Rayleigh dépolarisée et spectroscopie Raman", *J Journal de Chimie Physique*, 69, 64-70, 1972.

- [107] N. Djaker, "Microscopie par diffusion cohérente Raman CARS: Application à l'imagerie des milieux biologiques", Thèse de doctorat, Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III, 2006.
- [108] M. Khelifi, R. Zouari, M. Gargouri A. B. Salah, "Structure cristalline, étude par DSC, spectroscopie IR et diffusion Raman du composé  $\text{NH}_3(\text{CH}_2)_5\text{NH}_3\text{HgCl}_4$ ", Annales de chimie-Sciences des matériaux, 2002.
- [109] P. Colomban, "Analyse sans contact des céramiques anciennes par diffusion Raman", J Actualité Chimique, 12-17, 2003.
- [110] S. Benaziez, "Application des plasmons de surface à la détection de substances", thèse de doctorat, UB1, 2019.
- [111] B. Liedberg, C. Nylander I. Lunström, "Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing", J Sensors actuators, 4, 299-304, 1983.
- [112] E. Kretschmann H. Raether, "Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light", J Zeitschrift für Naturforschung A, 23, 2135-2136, 1968.
- [113] M. Willander S. Al-Hilli, "Analysis of biomolecules using surface plasmons", J Micro nano technologies in bioanalysis: Methods protocols, 201-229, 2009.
- [114] L. He, M. D. Musick, S. R. Nicewarner, F. G. Salinas, S. J. Benkovic, M. J. Natan C. D. Keating, "Colloidal Au-enhanced surface plasmon resonance for ultrasensitive detection of DNA hybridization", J Journal of the American Chemical Society, 122, 9071-9077, 2000.
- [115] M. E. Rahaman, R. Saha, M. S. Ahsan I.-B. Sohn, "Design and performance analysis of a D-shaped PCF and surface plasmon resonance based glucose sensor", 2018 4th international conference on electrical engineering and information & communication technology (iCEEICT), IEEE, 2018.
- [116] W. C. Wong, C. C. Chan, J. L. Boo, Z. Y. Teo, Z. Q. Tou, H. B. Yang, C. M. Li K. C. Leong, "Photonic crystal fiber surface plasmon resonance biosensor based on protein G immobilization", J IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 19, 4602107-4602107, 2013.
- [117] F. B. K. Eddin, Y. W. Fen, A. R. Sadrolhosseini, J. Y. C. Liew W. M. E. M. M. Daniyal, "Optical Property Analysis of Chitosan-Graphene Quantum Dots Thin Film and Dopamine Using Surface Plasmon Resonance Spectroscopy", J Plasmonics, 17, 1985-1997, 2022.

- [118] A. Nooke, U. Beck, A. Hertwig, A. Krause, H. Krüger, V. Lohse, D. NegendankJ. Steinbach, "On the application of gold based SPR sensors for the detection of hazardous gases", *J Sensors Actuators B: Chemical*, 149, 194-198, 2010.
- [119] A. A. Rifat, R. Ahmed, A. K. Yetisen, H. Butt, A. Sabouri, G. A. Mahdiraji, S. H. YunF. M. Adikan, "Photonic crystal fiber based plasmonic sensors", *J Sensors Actuators B: Chemical*, 243, 311-325, 2017.
- [120] B. GholamzadehH. Nabovati, "Fiber optic sensors", *J International Journal of Electronics Communication Engineering*, 2, 1107-1117, 2008.
- [121] M. Debbal, M. Bouregaa, H. Chikh-Bled, M. E. K. Chikh-BledM. C. E. Ouadah, "Influence of temperature on the chromatic dispersion of photonic crystal fiber by infiltrating the air holes with water", *J Journal of Optical Communications*, 44, 163-166, 2023.
- [122] Q. Liu, S. Li, H. Chen, Z. FanJ. Li, "Photonic crystal fiber temperature sensor based on coupling between liquid-core mode and defect mode", *J IEEE Photonics Journal*, 7, 1-9, 2015.
- [123] Y. Lu, M. Wang, C. Hao, Z. ZhaoJ. Yao, "Temperature sensing using photonic crystal fiber filled with silver nanowires and liquid", *J IEEE Photonics Journal*, 6, 1-7, 2014.
- [124] M. Roman, D. Balogun, Y. Zhuang, R. E. Gerald, L. Bartlett, R. J. O'MalleyJ. Huang, "A spatially distributed fiber-optic temperature sensor for applications in the steel industry", *J Sensors*, 20, 3900, 2020.
- [125] K. AhmedM. Morshed, "Design and numerical analysis of microstructured-core octagonal photonic crystal fiber for sensing applications", *J Sensing Bio-Sensing Research*, 7, 1-6, 2016.
- [126] A. Abbaszadeh, S. MakoueiS. Meshgini, "New hybrid photonic crystal fiber gas sensor with high sensitivity for ammonia gas detection", *J Canadian Journal of Physics*, 100, 129-137, 2022.
- [127] G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. AfonjaR. Binions, "Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring", *J Sensors*, 10, 5469-5502, 2010.
- [128] T. Khanikar, M. DeV. K. Singh, "A review on infiltrated or liquid core fiber optic SPR sensors", *J Photonics Nanostructures-Fundamentals Applications*, 46, 100945, 2021.
- [129] S. A. Adnan, Z. H. TawfiqM. A. Fakhri, "Gold nanoparticles in liquid based on photonic crystal fiber PCF for sensors application", *Defect and Diffusion Forum, Trans Tech Publ*, 2020.

- [130] A. Z. Mohammed, B. R. Mahdi, A. H. Ajlan, "Oil Leakage Detection Using Various Thicknesses Technique", *J Advances in Natural Applied Sciences*, 11, 1-7, 2017.
- [131] M. J. B. M. Leon, M. A. Kabir, "Design of a liquid sensing photonic crystal fiber with high sensitivity, birefringence & low confinement loss", *J Sensing Bio-Sensing Research*, 28, 100335, 2020.
- [132] J. Guo, Q. Yang, W. Cui, X. Zou, Y. Yue, C. Wang, R. Li, Y. Liu, "Research on a New Type of Biological Solution Fiber Sensor Based on Hybrid-PCF", *J IEEE Sensors Journal*, 21, 16006-16014, 2021.
- [133] B. Pejčić, P. Eadington, A. Ross, "Environmental monitoring of hydrocarbons: A chemical sensor perspective", *J Environmental science technology*, 41, 6333-6342, 2007.
- [134] A. A. Rifat, K. Ahmed, S. Asaduzzaman, B. K. Paul, R. Ahmed, "Development of photonic crystal fiber-based gas/chemical sensors", *J Computational photonic sensors*, 287-317, 2019.
- [135] H. Thenmozhi, M. M. Rajan, K. Ahmed, "D-shaped PCF sensor based on SPR for the detection of carcinogenic agents in food and cosmetics", *J Optik*, 180, 264-270, 2019.
- [136] V. S. Chaudhary, D. Kumar, B. P. Pandey, S. Kumar, "Advances in photonic crystal fiber-based sensor for detection of physical and biochemical parameters-a review", *J IEEE Sensors Journal*, 2022.
- [137] L. Alwis, T. Sun, K. Grattan, "Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress", *J Measurement*, 46, 4052-4074, 2013.
- [138] E. Vorathin, Z. Hafizi, N. Ismail, M. Loman, "Review of high sensitivity fibre-optic pressure sensors for low pressure sensing", *J Optics Laser Technology*, 121, 105841, 2020.
- [139] L. Li, Y. Li, L. Yang, F. Fang, Z. Yan, Q. Sun, "Continuous and accurate blood pressure monitoring based on wearable optical fiber wristband", *J IEEE Sensors Journal*, 21, 3049-3057, 2020.
- [140] Y. Mei, T. Xia, H. Cai, Z. Liu, "Deep Learning Improved Spectral Demodulation of Interferometry Vernier Effect for Pressure Sensing", *J Journal of Lightwave Technology*, 2023.
- [141] J. N. Dash, R. Jha, J. Villatoro, S. Dass, "Nano-displacement sensor based on photonic crystal fiber modal interferometer", *J Optics letters*, 40, 467-470, 2015.

- [142] A. M. R. Pinto, J. M. Baptista, J. L. Santos, M. Lopez-Amo O. Frazão, "Micro-displacement sensor based on a hollow-core photonic crystal fiber", *J Sensors*, 12, 17497-17503, 2012.
- [143] H. V. Thakur, S. M. Nalawade, Y. Saxena K. Grattan, "All-fiber embedded PM-PCF vibration sensor for Structural Health Monitoring of composite", *J Sensors Actuators A: Physical*, 167, 204-212, 2011.
- [144] R. Patel, R. Cox N. Correll, "Integrated proximity, contact and force sensing using elastomer-embedded commodity proximity sensors", *J Autonomous Robots*, 42, 1443-1458, 2018.
- [145] S. Yuan, Z. Tong, W. Zhang Y. Cao, "Mechanism measurement of micro-displacement based on a novel MZ interferometer", 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, 2014.
- [146] V. Pruneri, C. Riziotis, P. G. Smith A. Vasilakos, "Fiber and integrated waveguide-based optical sensors", *J Journal of Sensors*, 2009, 2009.
- [147] X. Dong, H. Du, Z. Luo J. a. Duan, "Highly sensitive strain sensor based on a novel Mach-Zehnder interferometer with TCF-PCF structure", *J Sensors*, 18, 278, 2018.
- [148] V. Budinski D. Donlagic, "Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist and rotation: a review", *J Sensors*, 17, 443, 2017.
- [149] M. Ramakrishnan, G. Rajan, Y. Semenova, P. Lesiak, A. Domanski, T. Wolinski, A. Boczkowska, G. J. S. m. Farrell structures, "The influence of thermal expansion of a composite material on embedded polarimetric sensors", 20, 125002, 2011.
- [150] C. Zhu, H. Zheng, L. Ma, Z. Yao, B. Liu, J. Huang Y. Rao, "Advances in Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Physical and Mechanical Sensors: A Review", *J IEEE Sensors Journal*, 2023.

Chapitre III :

**Résultats et discussions**

### III.1. Introduction

Au cours de la dernière décennie, l'utilisation des fibres à cristaux photoniques dans le développement des détecteurs optiques a connu une croissance significative. Les fibres à cristaux photoniques offrent un certain nombre d'avantages qui les rendent attrayants pour certaines applications. Les capteurs à base des fibres à cristaux photoniques peuvent être utilisés dans une large gamme d'applications nécessitant une détection précise et sensible, notamment dans les domaines médical, environnemental, de la sécurité alimentaire, de la surveillance industrielle, et bien d'autres encore. En raison de leur haute sensibilité et de leur polyvalence, ces capteurs jouent un rôle de plus en plus important dans la surveillance et le contrôle des paramètres environnementaux critiques.

Ce chapitre est consacré à la conception de composants basés sur les cristaux photoniques qui nécessite l'utilisation d'outils de simulation spécifiquement adaptés aux applications en optoélectronique et en optique intégrée, le développement de méthodes de modélisation numérique précises et rapides demeure cruciale pour l'étude approfondie de ces structures. Parmi ces méthodes, la méthode des faisceaux propagés (BPM) que nous avons utilisée dans le calcul des propriétés optiques des capteurs à base des fibres à cristaux photoniques.

Dans ce contexte, nous allons analyser les caractéristiques de propagation dans les fibres à cristaux photoniques (FMAS) en tenant compte des paramètres géométriques, de leurs profils d'indice, à savoir le diamètre des trous ( $d$ ) et l'espacement entre les trous d'air ( $\Lambda$ ), en se basant sur les propriétés des fibres à cristaux photoniques. Ensuite, nous analyserons la structure du concept proposé. Les données fournies se concentrent principalement sur l'indice effectif et la dispersion chromatique. En fin, nous essaierons d'améliorer la sensibilité pour avoir une bonne détection. Ce travail comprend des différentes propositions de capteurs. Nous étudierons et analyserons chaque structure du concept proposé en utilisant la méthode BPM. Ensuite nous essaierons d'améliorer la sensibilité. Nous présenterons :

- Un capteur de pression avec une capacité à fonctionner dans des conditions difficiles et qui peut offrir des mesures précises et fiables pour de nombreuses industries.
- Un capteur de salinité, une solution avancée pour mesurer la salinité dans des divers environnements et peut être utile dans des applications dans des systèmes de surveillance et de contrôle.

- Un capteur de glucose, qui peut être une avancée significative dans la détection biomédicale et peut offrir des avantages considérables pour la santé et le bien-être.
- Un capteur de Malaria, qui peut jouer un rôle important dans la lutte contre la malaria et la réduction de son impact sur la santé.
- Un capteur chimique, qui peut améliorer la gestion des risques chimiques et de la protection de l'environnement.

### III.2. Méthodes de modélisation des PCFs

Les différences entre la structure géométrique réelle et la structure périodique idéale sont causées par les difficultés de fabrication des fibres optiques micro-structurées. Pour cette raison, les simulations numériques sont cruciales pour la conception et la modélisation des PCF.

L'analyse et le contrôle des erreurs de calcul dans un algorithme nécessitent une analyse numérique combinée à une analyse mathématique rigoureuse. Elle est également nécessaire pour l'étude de convergence et de conditionnement des solveurs itératifs dans la résolution du système d'équations linéaires obtenu après transformation des équations de Maxwell. On peut affirmer que l'analyse numérique permet de vérifier l'efficacité du choix du modèle numérique utilisé pour résoudre les équations de Maxwell appliquées aux problèmes de nanostructures.

De nombreuses méthodes sont employées pour simuler les cristaux photoniques dans les structures de guidage, afin de déterminer les paramètres optiques des cristaux photoniques et d'analyser la propagation du champ électromagnétique. Ces méthodes incluent la méthode de propagation des faisceaux (BPM) [1], la méthode du calcul fini (FEM) [2], la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [3] et la méthode des éléments finis. Grâce à ces méthodes, il devient possible de calculer et de représenter graphiquement les courbes de réflexion, de transmission ainsi que le diagramme de rayonnement

Un modèle scalaire approximatif fournit de bonnes informations qualitatives et est facile à utiliser, ce qui en fait un outil utile pour faciliter les efforts de fabrication. Cependant, l'utilisation d'un modèle vectoriel complet, nécessaire pour prédire des quantités sensibles telles que la dispersion et la biréfringence, est essentielle pour modéliser les PCF avec précision.

Les propriétés optiques du matériau, la géométrie de la fibre, les effets de propagation et d'autres paramètres sont pris en compte dans le domaine complexe de la modélisation des fibres à

cristaux photoniques. Quelques-unes des méthodes de modélisation les plus courantes utilisées pour étudier les fibres à cristaux photoniques sont les suivantes :

### III.2.1. Méthode des éléments finis FEM

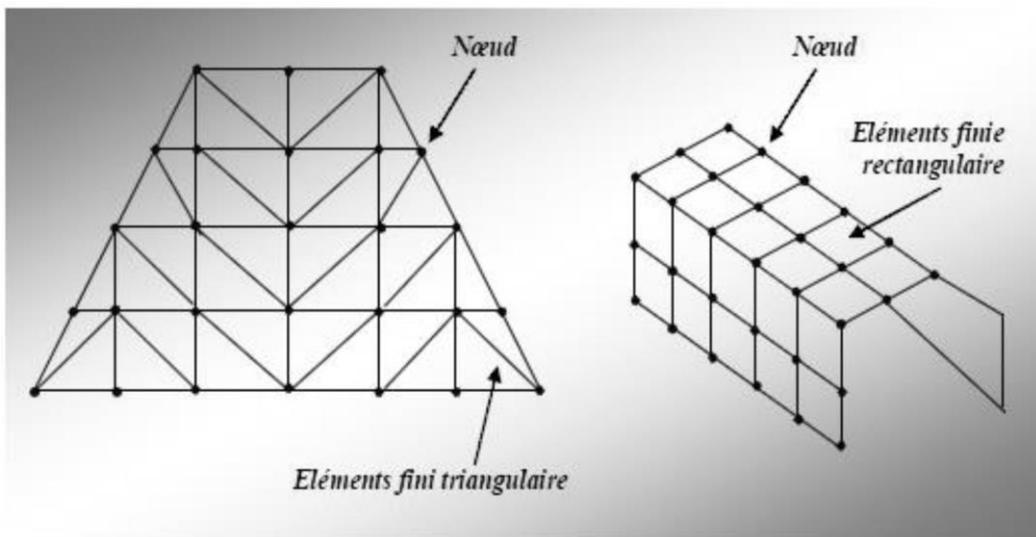
En effet, dans le domaine de l'électromagnétisme, la méthode des éléments finis (FEM) est largement utilisée, en particulier pour résoudre les équations de Maxwell qui décrivent le comportement des champs électriques et magnétiques. Voici quelques points importants sur l'utilisation de la FEM dans l'électromagnétisme. La méthode des éléments finis (FEM) est une méthode générale qui peut être utilisée pour résoudre une large gamme de problèmes physiques [4, 5]:

- Elle peut être utilisée pour résoudre des problèmes stationnaires (où les propriétés du système ne changent pas avec le temps) ainsi que des problèmes non stationnaires (où les propriétés varient avec le temps). Cela la rend adaptée à la simulation de phénomènes transitoires.
- La FEM est capable de traiter des problèmes linéaires et non linéaires. Des itérations peuvent être nécessaires pour trouver une solution à des problèmes non linéaires.
- La méthode peut être appliquée à des matériaux homogènes (avec des propriétés constantes) ou hétérogènes (avec des propriétés variables). Cela permet de modéliser des structures composées de différents matériaux.
- Les problèmes avec des géométries simples ou très complexes peuvent être résolus avec la FEM. La capacité de la méthode à s'adapter à diverses formes géométriques explique sa flexibilité.
- La méthode des éléments finis peut être appliquée en toutes dimensions, que ce soit pour des problèmes bidimensionnels (2D) ou tridimensionnels (3D). Cela permet de modéliser des systèmes complexes dans l'espace.

La méthode des éléments finis est une méthode polyvalente qui peut être utilisée pour résoudre une variété de problèmes physiques, offrant une grande flexibilité pour la modélisation et la simulation de divers phénomènes.

La FEM est basée sur l'approche par éléments finis, une technique qui permet d'approcher une fonction dans un espace donné en connaissant les valeurs dans certains nœuds du domaine (figure III.1). Cependant, la géométrie complexe des systèmes en question rend très difficile, voire impossible, l'approximation de la solution dans l'ensemble du domaine. Pour éviter cette

difficulté, le domaine est divisé en sous-domaines appelés éléments de maillage, sur lesquels l'approximation de l'inconnue est effectuée localement, ce qui est appelé interpolation [6].



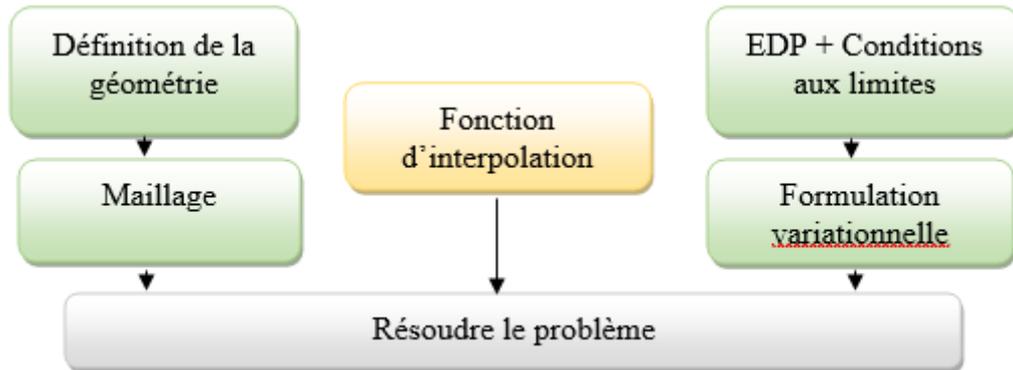
**Figure III. 1** Modélisations des structures par éléments finis [7].

La méthode des éléments finis est fréquemment employée dans les simulations numériques pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP). Elle repose sur la représentation géométrique de la structure sous la forme d'un maillage [8].

- Dans un premier temps, les équations aux dérivées partielles sont formulées sous une forme variationnelle, s'assurant ainsi de leur validité pour des fonctions test appartenant à un espace vectoriel spécifié.
- Pour résoudre les équations aux dérivées partielles et traiter les conditions aux limites, la discrétisation des formulations intégrales, dérivées de la formulation variationnelle, est effectuée en décomposant la structure en éléments géométriques de formes simples. Dans le cas des structures planes, on utilise fréquemment des triangles, tandis que pour les problèmes tridimensionnels, les éléments de prédilection sont généralement des tétraèdres, comme illustré dans la figure III.1.
- En cas de complexité croissante du problème, la méthode des résidus pondérés est employée.
- À chaque nœud du réseau des éléments finis (FEM), la résolution de l'équation aux dérivées partielles produit une solution approximative à l'aide de fonctions d'interpolation. Les fonctions de forme, souvent des polynômes de Lagrange, sont

définies localement à chaque nœud du domaine et respectent également les conditions aux limites du problème, comme illustré dans la figure III.2.

- La dernière étape implique le développement d'une solution approximative sur une base discrète de fonctions d'interpolation. Cette solution est continue et connue sur l'ensemble du domaine. Il est important de noter que cette approximation n'est valable que pour les problèmes d'équations aux dérivées partielles du second ordre.



**Figure III. 2** Les différentes étapes de la FEM [8].

En raison de sa capacité à traiter des géométries complexes et des matériaux hétérogènes, la méthode des éléments finis (FEM) est souvent utilisée pour la modélisation des cristaux photoniques. Dans le domaine optique, les cristaux photoniques présentent des variations périodiques de l'indice de réfraction. Ils contrôlent la propagation de la lumière dans les guides d'ondes, les résonateurs et les filtres optiques. La FEM permet aux ingénieurs et aux chercheurs de concevoir et d'optimiser des dispositifs optiques pour diverses applications, telles que les télécommunications, les capteurs optiques et les technologies de traitement de l'information, en offrant une approche flexible pour modéliser et simuler les cristaux photoniques.

### III.2.2. Méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD

La méthode des différences finies est une approche bien établie pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP). Elle est également désignée comme une méthode d'ordre N en raison de son coût de calcul relativement faible [9].

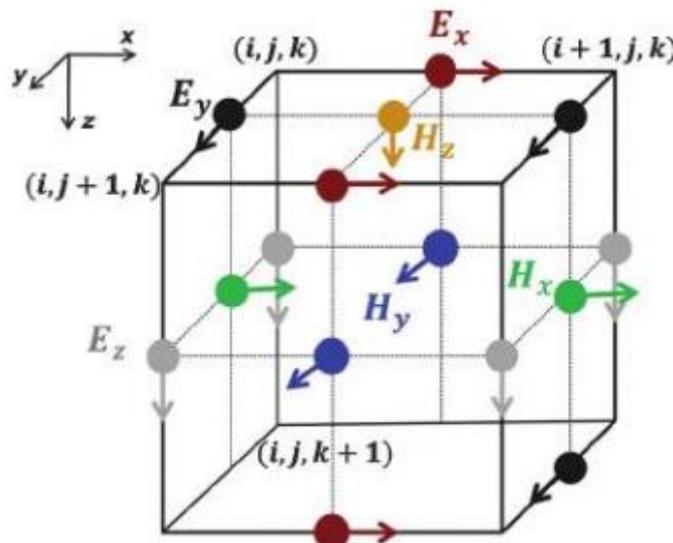
En 2000, Sigalas et Garcia [10] ont employé la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), une approche couramment utilisée en photonique. Ils l'ont utilisée pour déterminer le coefficient de transmission des ondes acoustiques dans une structure photonique tridimensionnelle. Cette méthode se révèle particulièrement utile pour étudier la réponse

spectrale d'un système non nécessairement périodique et pour calculer les distributions de champ dans des structures de dimensions finies [11]. En 1966, Kane Yee a présenté une technique de résolution numérique des équations de Maxwell basée sur la discrétisation des champs électromagnétiques par des différences finies centrées d'ordre deux dans l'espace et le temps, selon le schéma de Yee [12].

La FDTD trouve des applications variées dans de nombreux domaines tels que les micro-ondes (antennes, interactions onde/matière comme les radars et téléphones portables/humains), l'optique intégrée (filtres d'insertion/extraction, guides et cavités basés sur des structures périodiques), et bien d'autres.

La méthode FDTD est particulièrement adaptée pour modéliser le comportement temporel des champs électromagnétiques dans des structures complexes, et elle est souvent utilisée dans des domaines tels que la photonique, les antennes, les micro-ondes, l'optique intégrée, etc. Elle offre l'avantage de traiter naturellement les phénomènes transitoires et les interactions électromagnétiques complexes.

La méthode FDTD est une technique numérique qui permet de résoudre les équations différentielles dans le domaine temporel. Elle consiste à discrétiser de manière spécifique la propagation des champs électromagnétiques  $E$  et  $H$  dans l'espace et dans le temps.



**Figure III. 3** Maille élémentaire (3D) de Yee [12].

Un maillage est appliqué dans l'espace réel, réalisé selon le schéma de Yee. Les conditions initiales définissent les valeurs du champ électromagnétique, et une source d'excitation est

introduite, caractérisée par un spectre large en fréquence afin de couvrir toutes les fréquences des modes résonants. Le calcul du spectre à tous les points de la structure peut être réalisé grâce à la transformée de Fourier. Pour obtenir la réponse fréquentielle du cristal photonique, les conditions aux limites sont appliquées, et ces conditions revêtent une importance cruciale dans cette méthode en raison du traitement essentiellement dédié aux structures finies.

La méthode FDTD repose sur la résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel. Ces équations sont ensuite discrétisées et implémentées dans un logiciel facile à utiliser. Cependant, il est important de noter que cette méthode de calcul est souvent caractérisée par une lenteur significative et nécessite des ressources informatiques importantes. Cela est dû au fait que les champs électromagnétiques doivent être calculés pour chaque point de la structure et à chaque incrément de temps. De plus, la durée totale du calcul peut être prolongée, notamment dans le cas de structures résonantes.

### III.2.3. Méthode de propagation des faisceaux BPM

Parmi les méthodes numériques les plus répandue pour la modélisation des structures périodiques, la méthode des faisceaux propagés ou (Beam Propagation Method : BPM) est particulièrement importante. C'est la méthode qu'on va adopter par la suite pour simuler nos structures.

La méthode numérique des faisceaux propagés, est une approche qui simule la propagation d'ondes. Cette méthode permet de prédire la distribution du champ à l'intérieur d'un composant optique à partir d'un champ électrique incident. Le principe fondamental de la BPM consiste à diviser la structure guidante en cellules ou tranches élémentaires espacées de  $\Delta z$ , puis à calculer le champ d'une tranche donnée à partir de la tranche précédente [1, 13, 14].

L'idée fondamentale de la BPM scalaire (ou conventionnelle) consiste à décrire le champ électromagnétique comme une superposition d'ondes planes se propageant dans un milieu homogène. En cas d'inhomogénéité du milieu, la propagation est modélisée par l'intégrale de toutes les ondes planes dans le domaine spectral. L'inhomogénéité du milieu se manifeste par une correction de phase simple dans le domaine spatial.

Une autre variante de la BPM basée sur la méthode des éléments finis (FE-BPM à grand angle), a été développée. Cette méthode est particulièrement adaptée à la modélisation de guide [1] et fait usage de l'approximation de Padé [15].

La BPM présente l'avantage de permettre l'étude de guides optiques sans nécessiter une connaissance préalable de leurs propriétés modales. De plus, sa rapidité de calcul et l'utilisation limitée de la capacité mémoire, attribuées à la discrétisation spatiale dans une seule des deux directions, en font une méthode prometteuse par rapport aux approches numériques considérées plus gourmandes en ressources, souvent qualifiées de "lourdes".

La méthode choisie pour nos simulations est la BPM. Cette méthode constitue la fondation de la programmation des algorithmes de calcul adoptés car il est apparu que la méthode vectorielle est plus précise et efficace que les méthodes alternatives. Grâce à cette approche, nous avons pu prédire les caractéristiques de la propagation et de la dispersion des fibre microstructuré, notamment la dispersion chromatique du mode fondamental en fonctions des paramètres opto-géométriques.

Le module de propagation incorporé dans RSoft Photonics CAD SUITE représente un outil novateur qui permet de simuler la propagation optique dans les guides d'ondes en deux et trois dimensions. Il est basé sur la méthode BPM (Beam Propagation Method) [16].

### **III.3. Conception d'un capteur de pression**

Au cours des dernières décennies, les capteurs à fibre microstructurée ont été un domaine de recherche et de développement dans le domaine des capteurs optiques. Ces capteurs produisent des dispositifs sensibles à une variété de paramètres physiques et chimiques en utilisant les propriétés optiques des fibres optiques microstructurées, également appelées fibres à cristal photonique (PCF pour Photonic Crystal Fiber). Parmi les capteurs optiques on peut distinguer les capteurs à fibre microstructurée de pression mesurent les changements de pression en utilisant les propriétés optiques des fibres à cristal photonique (PCF). Les avantages de ces capteurs comprennent leur sensibilité élevée, leur compacité et leur capacité à fonctionner dans des conditions difficiles.

Un capteur à fibres est généralement sensible à plusieurs grandeurs physiques, parmi lesquelles la pression est souvent incluse. Par conséquent, notre objectif principal était de trouver des dispositifs exclusivement sensibles à un paramètre et non affectés par les effets des autres. En

raison de leur coût réduit, de leur grande sensibilité, de leur petite taille, de leur robustesse, de leur flexibilité et de leur capacité de surveillance à distance, les capteurs à fibres optiques constituent une option attrayante pour l'industrie électronique.

Lors de l'observation de divers événements environnementaux, la pression est une mesure importante. Des applications de précision sont utilisées pour surveiller de nombreux processus industriels avec une grande précision. Le capteur de pression à fibre optique est bien adapté à une utilisation avec les corps humains et animaux, les rendant utiles pour le diagnostic médical. La pression des fluides corporels peut être mesurée à l'aide de capteurs de pression basés sur les fibres optiques à cristal photonique (PCF). La pression et la température sous-marines peuvent également être mesurées avec ces capteurs [17].

Cette partie réside dans le développement du premier capteur basé sur les fibres optiques à cristal photonique (PCF). Les PCF offrent de nouvelles solutions optiques, cependant, certaines d'entre elles sont difficiles à manipuler. Par exemple, la faible transmission optique des PCF rend difficile l'utilisation pour créer des épissures et des connecteurs de haute qualité (faibles pertes, grande résistance) [18]. Cela est fortement influencé par l'état des petits trous environnants [19].

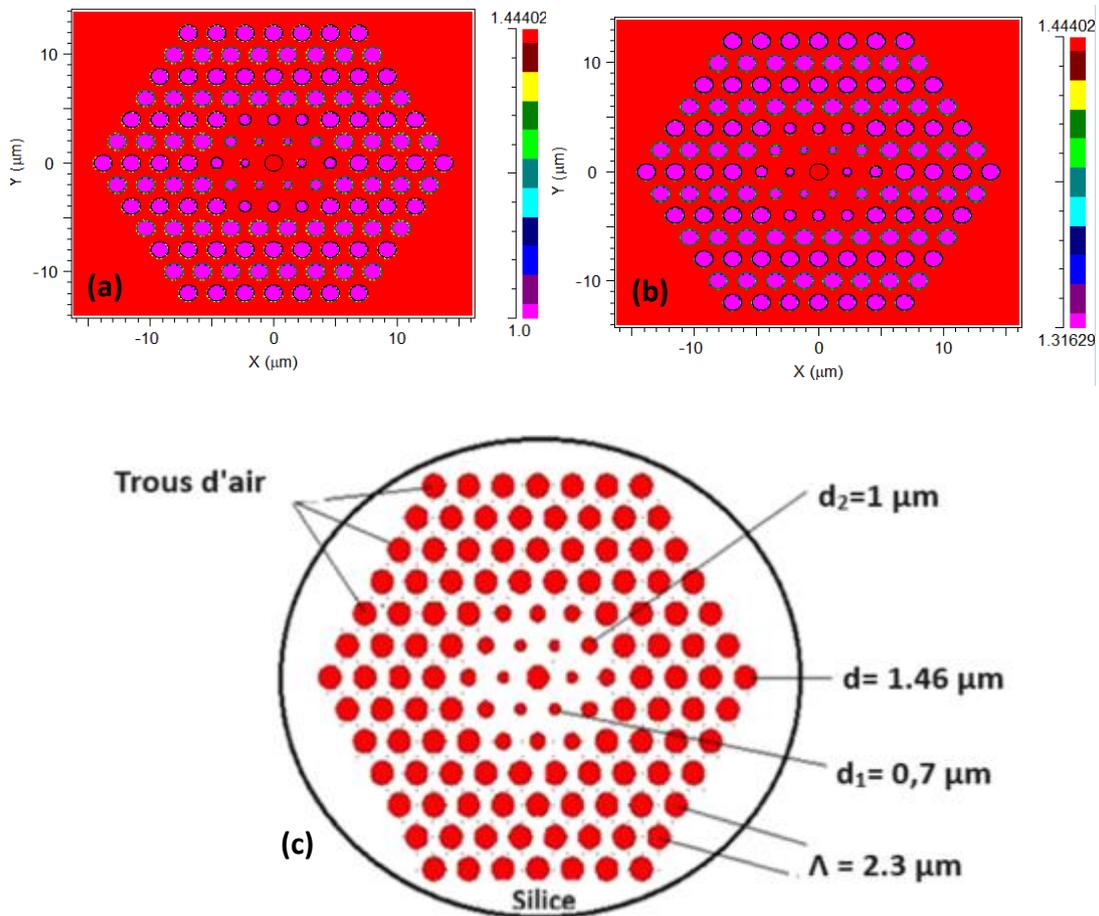
Donc on va mesurer la pression dans des différents environnements, et comme les capteurs normaux ne fournissent pas une telle précision, notre contribution consiste à utiliser des fibres de cristal photonique avec un diamètre de 125  $\mu\text{m}$ . Pour montrer que la pression peut influencer la dispersion chromatique des PCF, l'objectif principal est de développer de nouveaux principes fonctionnels pour les capteurs de fibres pour la pression. Étant donné que le développement de tels capteurs est plutôt limité à ce jour, l'approche de ce projet est avant tout exploratoire, avec une base théorique et une compréhension accrue des phénomènes impliqués.

L'objectif secondaire de ce travail est d'obtenir les meilleures performances possibles (haute résolution, grande amplitude et faible erreur de mesure de sensibilité).

### **I.2.1.1 Description de la structure de la PCF**

Nous allons étudier une structure d'une fibre microstructurée hexagonale avec un arrangement de trous triangulaire, en mesurant la dispersion chromatique pour des différentes valeurs de pression en injectant les trous d'air par l'eau.

Le but de ce travail est d'avoir un capteur de pression à base des cristaux photoniques en utilisant la méthode de modélisations BPM qui repose sur un algorithme de résolution itératif qui demande une valeur de départ de l'utilisateur.



**Figure III. 4** Profils d'indice de la fibre proposée. (a) quand les trous sont remplis d'air. (b) quand les trous sont remplis de l'eau. (c) les paramètres géométriques la Fibre microstructurée.

La structure se compose de trous d'air de différentes tailles qui ont été choisis après plusieurs simulations pour obtenir une courbe de dispersion appropriée. Les figures III.4 (a) et (b) montrent le profil d'indice de la fibre microstructurée simulée quand les trous remplis d'air et quand les trous remplis d'eau successivement. Sur la figure III.4 (c), on peut voir que la structure de la fibre comprend six anneaux et trois tailles de trous d'air. Le diamètre des trous d'air dans le premier anneau ( $d_1$ ) est de  $0,7 \mu\text{m}$ . Dans le deuxième anneau, le diamètre est  $d_2=1 \mu\text{m}$ , le pas du réseau  $\Lambda$  est de  $2.3 \mu\text{m}$ , et les trous d'air restants ont un diamètre  $d= 1.46 \mu\text{m}$ . Le fond de la PCF est composé de silice, et a un indice de réfraction de  $n_{\text{silice}}$ .

Pour reproduire de manière précise le mode de guidage et évaluer les performances du capteur, L'équation suivante consiste à calculer l'indice de réfraction de l'eau liquide en fonction de la longueur d'onde, de la température et de la pression. Cette équation a été présentée lors de la 9e Conférence internationale sur les propriétés des vapeurs, qui s'est tenue à Munich, en Allemagne, en 1979 [20] :

$$n_{eau}(\lambda, T, P) = \sqrt{\frac{a_1}{\lambda^2 - \lambda_a^2} + a_2 + a_3 \cdot \lambda^2 + a_4 \cdot \lambda^4 + a_5 \cdot \lambda^6} \quad \text{III. 1}$$

$$+ (b_1 + b_2 \cdot \lambda^2 + b_3 \cdot \lambda^4) \cdot (T - T_b) + (b_4 + b_5 \cdot \lambda^2 + b_6 \cdot \lambda^4) \cdot (T - T_b)^2 + (b_7 + b_8 \cdot \lambda^2 + b_9 \cdot \lambda^4) \cdot (T - T_b)^3$$

$$+ [c_1 + c_2 \cdot \lambda^2 + (c_3 + c_4 \cdot \lambda^2) \cdot T] \cdot (P - P_b) + (c_5 + c_6 \cdot \lambda^2) \cdot (P - P_b)^2$$

avec :  $0.182\mu\text{m} \leq \lambda \leq 2.770\mu\text{m}$

$$-10^\circ\text{C} \leq T < 100^\circ\text{C}$$

$$1\text{bar} \leq P \leq 1200\text{bar}$$

Les coefficients ont été choisis par la méthode des moindres carrés avec une température de référence  $T_b = 20^\circ\text{C}$ , sélectionnée selon l'échelle de la Température Pratique Internationale 1968 correspondant à la température de  $T_b = 19.993^\circ\text{C}$  et une pression de référence  $P_b = 1\text{ atm} = 1.01325\text{ bar}$  [21]. Ces conditions ont été utilisées pour la majorité des mesures. La longueur d'onde  $\lambda$ , la température  $T$  et la pression  $P$  doivent être fournies en :  $\mu\text{m}$ ,  $^\circ\text{C}$  et  $\text{bar}$  [21].

**Tableau III. 1** Développement des fibres à cristaux photoniques

$\lambda_a^2 =$	0.018058	$b_1 =$	$-8.454823 \cdot 10^{-5}$	$c_1 =$	$8.419632 \cdot 10^{-6}$
$a_1 =$	$5.743534 \cdot 10^{-3}$	$b_2 =$	$-2.787742 \cdot 10^{-5}$	$c_2 =$	$1.941681 \cdot 10^{-5}$
$a_2 =$	1.769238	$b_3 =$	$2.608176 \cdot 10^{-6}$	$c_3 =$	$-7.762524 \cdot 10^{-8}$
$a_3 =$	$-2.797222 \cdot 10^{-2}$	$b_4 =$	$-2.050176 \cdot 10^{-6}$	$c_4 =$	$4.371257 \cdot 10^{-8}$
$a_4 =$	$8.715348 \cdot 10^{-3}$	$b_5 =$	$1.019989 \cdot 10^{-6}$	$c_5 =$	$7.089664 \cdot 10^{-9}$
$a_5 =$	$-1.413942 \cdot 10^{-3}$	$b_6 =$	$-2.611919 \cdot 10^{-6}$	$c_6 =$	$-2.240384 \cdot 10^{-8}$
		$b_7 =$	$8.194989 \cdot 10^{-9}$		
		$b_8 =$	$-8.107707 \cdot 10^{-9}$		

		$b_9 =$	$4.877274 * 10^{-8}$		
--	--	---------	----------------------	--	--

Pour étudier la dispersion chromatique de la PCF proposée, nous avons utilisé l'équation de Sellmeier qui peut être utilisée pour mesurer et modéliser l'indice de réfraction effectif  $n_{\text{eff}}$  des trous d'air creux qui ont été placés dans de la silice en tant que matériau de fond, comme indiqué par l'équation suivante [22]:

$$n_{\text{silice}}^2 - 1 = \frac{0.6961663 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 + (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2} \quad \text{III. 2}$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde.

### III.3.1. Résultats et interprétations

Tout d'abord, nous avons simulé la dispersion de la fibre proposée par la méthode numérique BPM avec et sans eau afin d'étudier l'influence de l'infiltration d'eau dans les trous d'air de la fibre microstructurée. La figure III.5 présente la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ). On remarque que lorsque les trous du PCF sont remplis d'air, la longueur d'onde du zéro dispersion (ZDW) sera nulle et située à une valeur de 1,16  $\mu\text{m}$ . Cependant, après le remplissage d'eau dans les trous d'air, le ZDW est déplacée à 1,4  $\mu\text{m}$ . Et c'est un bon résultat en ce qui concerne la localisation de la ZDW.

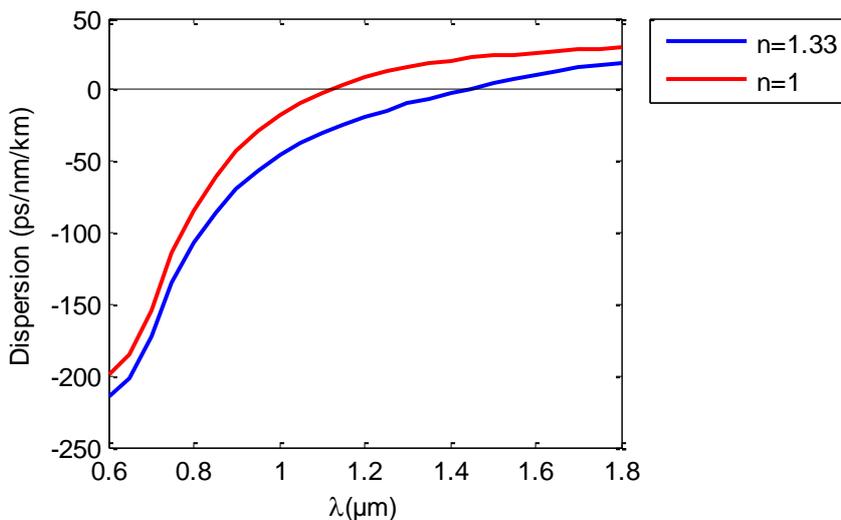
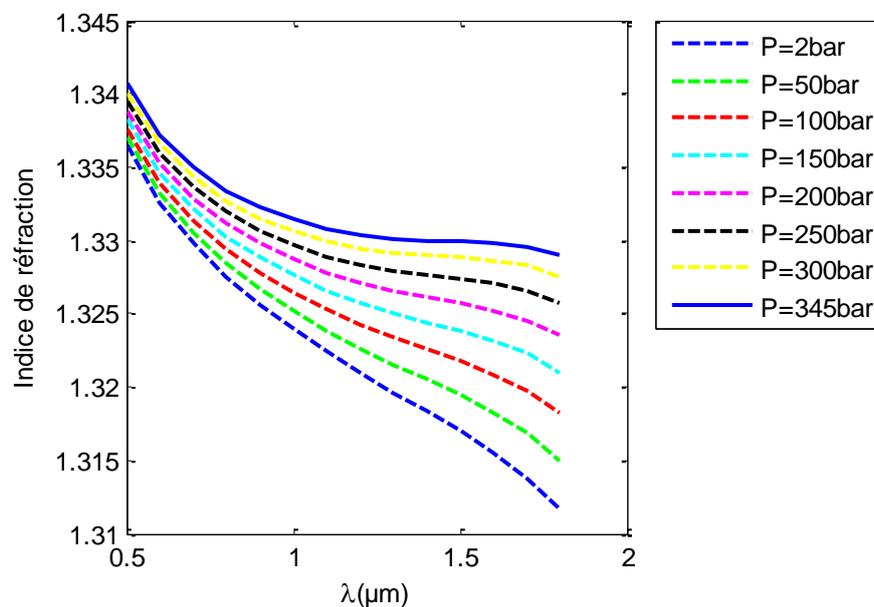


Figure III. 5 La variation de la dispersion chromatique avec et sans eau.

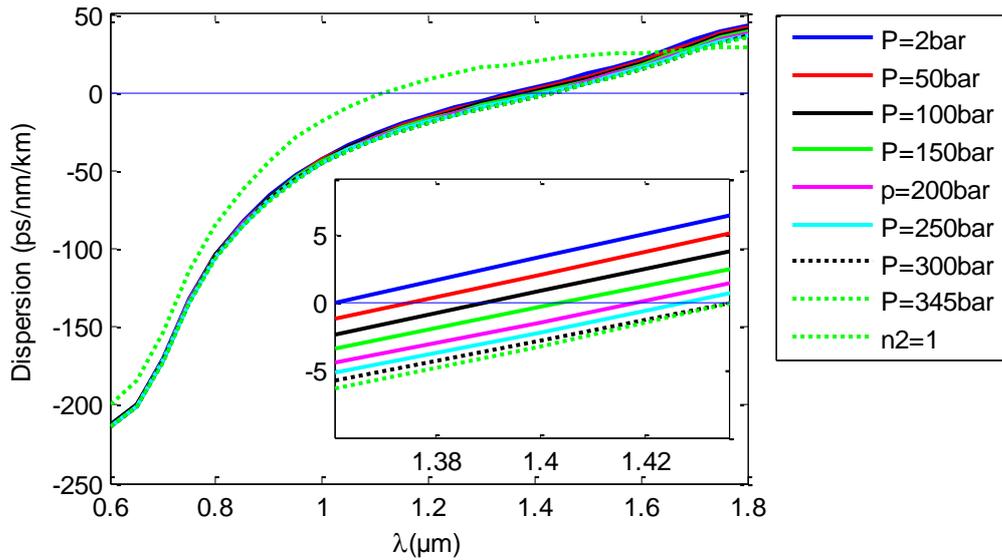
L'indice de réfraction des trous d'air est largement indépendant de la température et de la pression. On peut conclure que l'effet de la pression sur le PCF est négligeable. En revanche, l'indice de réfraction de l'eau ( $H_2O$ ) dépend à la fois de la température et de la pression. Pour cette raison, les trous d'air ont été remplis d'eau. La température a été fixée à  $25\text{ }^\circ\text{C}$  et la pression choisie était de 2 bars. La dispersion a été déplacée vers des longueurs d'onde plus grandes lors de l'infiltration des trous avec de l'eau ; la dispersion chromatique est relative à l'indice de réfraction  $n_{\text{eau}}(\lambda, T, P)$  et est effectivement liée à la pression.

La figure III.6 montre la variation de l'indice de réfraction de l'eau en fonction de la longueur d'onde pour différentes pressions. Nous remarquons que la pression affecte directement la dispersion ; lorsque la pression augmente, l'indice de réfraction augmente également.



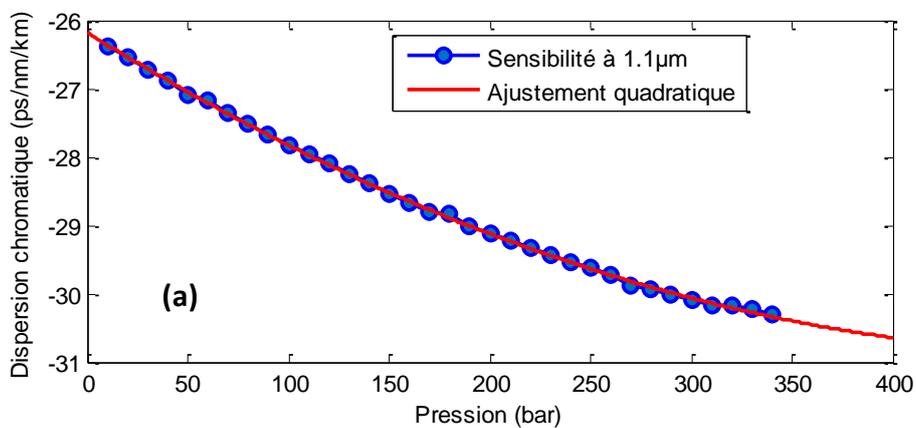
**Figure III. 6** L'indice de réfraction de l'eau en fonction de la longueur d'onde pour des différentes pressions

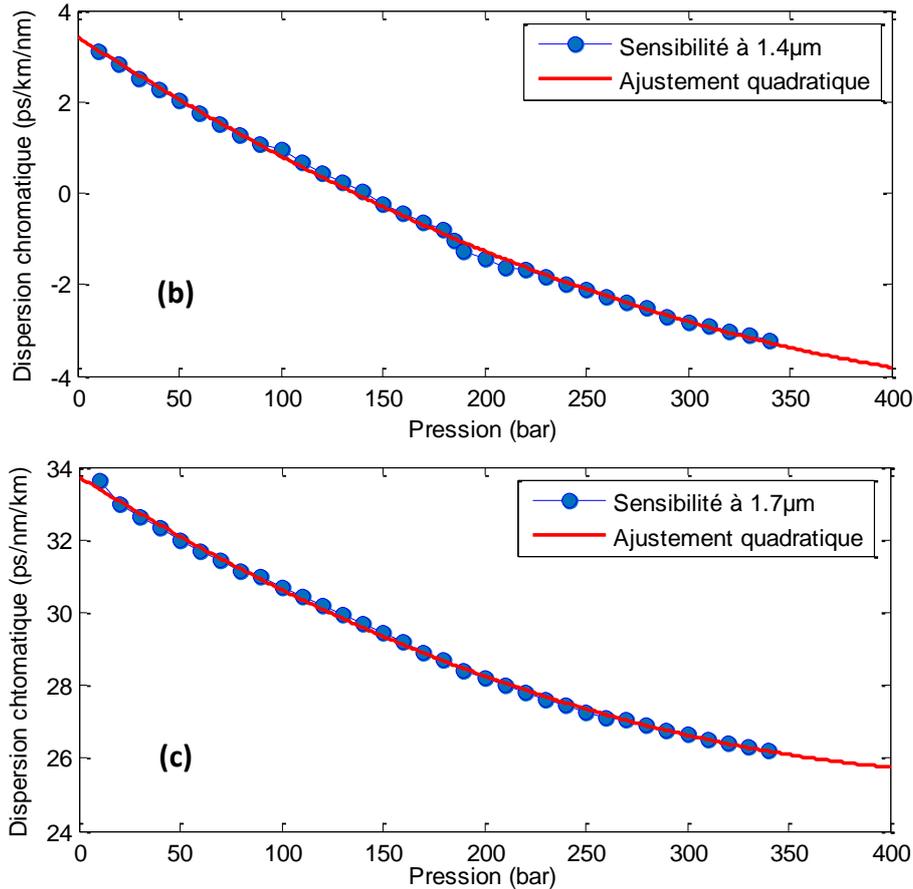
La prochaine étape consiste à modifier la pression. Nous commencerons par simuler la dispersion du PCF infiltré avec de l'eau pour différentes pressions. La pression la plus basse sera de 2 bars et la plus élevée de 345 bars. Cette plage a été choisie en fonction de [22].



**Figure III. 7** La variation de la dispersion en fonction de la longueur d’onde pour des différentes pressions.

La figure III.7 illustre la relation entre la variation de la dispersion chromatique et le changement de pression, démontrant ainsi que le PCF peut être utilisé comme un capteur de pression. Cette variation met en évidence la relation entre la dispersion chromatique et la pression.





**Figure III. 8** La variation de la dispersion chromatique en fonction de la pression (a) Quand  $\lambda = 1.1\mu\text{m}$ . (b) Quand  $\lambda = 1.4\mu\text{m}$ . (c) Quand  $\lambda = 1.7\mu\text{m}$ .

Pour calculer la sensibilité de ce capteur, nous allons étudier la dispersion chromatique pour les trois longueurs d'onde :  $1.1\mu\text{m}$ ,  $1.4\mu\text{m}$  et  $1.7\mu\text{m}$ .

Tout d'abord, La sensibilité a été calculée comme suit :

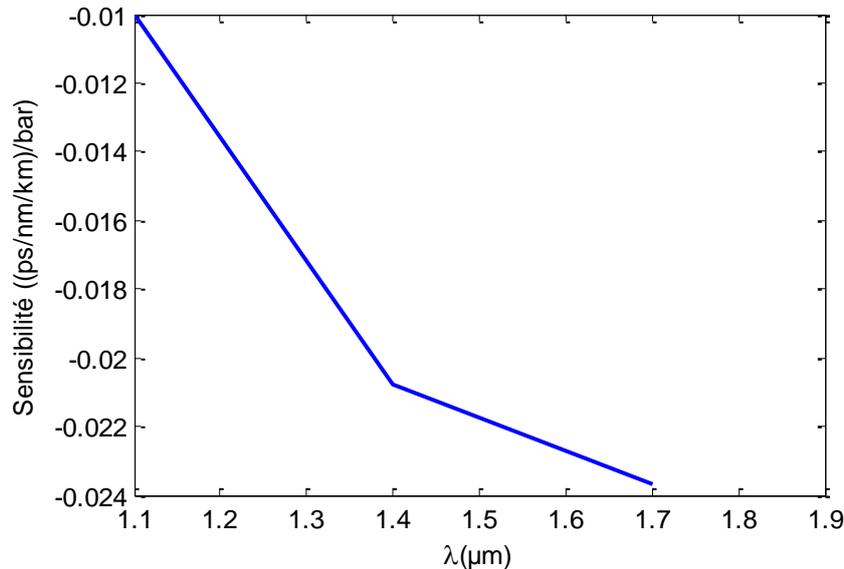
$$S((\text{ps/nm/km})/\text{bar}) = \Delta \text{Dispersion} / \Delta \text{Pression} \quad \text{III. 3}$$

On peut remarquer qu'à partir de figure III.8 (a) que la sensibilité est d'environ  $0.01(\text{ps/nm/km})/\text{bar}$  en utilisant l'ajustement quadratique.

Ensuite, nous calculons la sensibilité pour la longueur  $1.4\mu\text{m}$ . Les calculs ont été effectués à une longueur d'onde fixe et à des différents niveaux de pression. Nous pouvons calculer la sensibilité comme indiqué dans la figure III.8 (b) selon les données expérimentales mesurées, la valeur moyenne de la sensibilité à la pression peut être calculée à  $-0,0207737 (\text{ps/nm/km})/\text{bar}$  en appliquant l'ajustement quadratique.

Par la suite, nous prendrons la longueur d'onde  $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$ , et nous calculerons la valeur moyenne de la sensibilité du capteur. La figure III.8 (c) illustre la sensibilité lorsque la longueur d'onde était de  $1,7 \mu\text{m}$ . À ce stade, en utilisant l'ajustement quadratique, nous pouvons calculer la sensibilité du capteur à être de  $-0,0236908 \text{ (ps/nm/km)/bar}$ .

Après plusieurs calculs et comparaisons entre ces longueurs d'onde qui ont été choisies, on peut remarquer que la sensibilité lorsque la longueur d'onde est de  $1,7 \mu\text{m}$  est meilleure que pour la longueur d'onde est de  $1,1$  et  $1,4 \mu\text{m}$ . On peut voir à partir de la figure III.9 que ce capteur de pression est plus sensible à l'augmentation de la longueur d'onde. La sensibilité change avec le changement de la longueur d'onde. De cela, il peut être illustré qu'il y a peu de changement de sensibilité tandis qu'un changement rapide. Ainsi, il est possible d'utiliser le capteur suggéré pour la détection de pression.



**Figure III. 9** La sensibilité en fonction des longueurs d'onde

### III.4. Conception d'un capteur de salinité

En raison de ses propriétés remarquables des fibres microstructurée, le PCF suscite également un vif intérêt dans le domaine de la détection. Il trouve des applications dans diverses techniques de détection parmi ces application la détection de la salinité.

La détection de la salinité est un domaine émergent avec des applications potentielles dans l'océanographie, le suivi environnemental et les industries pétrolière et gazière [23]. Les fibres à cristal photonique (PCFs) peuvent être utilisées pour mesurer la salinité (la concentration de

sels dissous dans l'eau) grâce à divers mécanismes [24]. Étant donné que les capteurs à base de fibres optiques sont déjà largement utilisés, il est possible d'obtenir des informations sur la salinité en mesurant l'indice de réfraction de l'eau de mer. Les capteurs de salinité à fibre optique actuels incluent diverses technologies telles que les interféromètres à réseaux classiques, les résonateurs en anneau à microfibres, les cavités Fabry-Pérot à base de fibres, les fibres polies latéralement, les fibres coniques et les fibres à cristaux photoniques [25-27]. Parmi tous ces candidats, les PCFs se distinguent par leur capacité à offrir des capteurs à fibre optique hautement sensibles, des propriétés optiques intéressantes et un processus de fabrication simple. Cela les positionne comme l'un des candidats les plus prometteurs pour les applications de capteurs [28].

L'objectif de notre étude était de simuler un capteur à fibre optique basé sur une fibre microstructurée pour mesurer la salinité. En utilisant la méthode numérique BPM, nous avons modélisé le comportement de la lumière à l'intérieur de la fibre microstructurée et évalué sa sensibilité à la salinité. La simulation nous a permis d'analyser les variations de lumière en fonction de la salinité de l'échantillon testé. Les résultats obtenus nous ont permis de comprendre le principe de fonctionnement du capteur de salinité à fibre optique et d'optimiser ses performances en termes de sensibilité et de précision.

### **I.4.1. Description de la structure de la PCF**

Nous avons commencé la simulation en employant une méthode numérique pour étudier l'impact des variations de la salinité sur la dispersion. En ajustant la concentration de la salinité de 0 à 100 %, nous avons calculé la dispersion en fonction de la longueur d'onde pour initier la simulation à l'aide de la méthode BPM.

Tout d'abord, afin de reproduire précisément le mode de guidage et d'analyser les performances du capteur, la dispersion des matériaux a été réalisée en utilisant une technique d'analyse basée sur la formule de Sellmeier [22]. En tenant compte de l'indice de réfraction de la silice pure, nous avons utilisé une approche numérique pour étudier et calculer les paramètres de dispersion chromatique de la fibre à cristal photonique.

La relation de Lorentz-Lorenz établit que l'indice de réfraction d'une substance est corrélé à sa densité et, par conséquent, à la présence de l'eau salé. En mesurant l'indice de réfraction (RI) du niveau d'eau, nous pouvons donc déterminer la salinité correspondante de l'eau de mer. La longueur d'onde d'excitation, la salinité et la température de l'eau affectent tous l'indice de

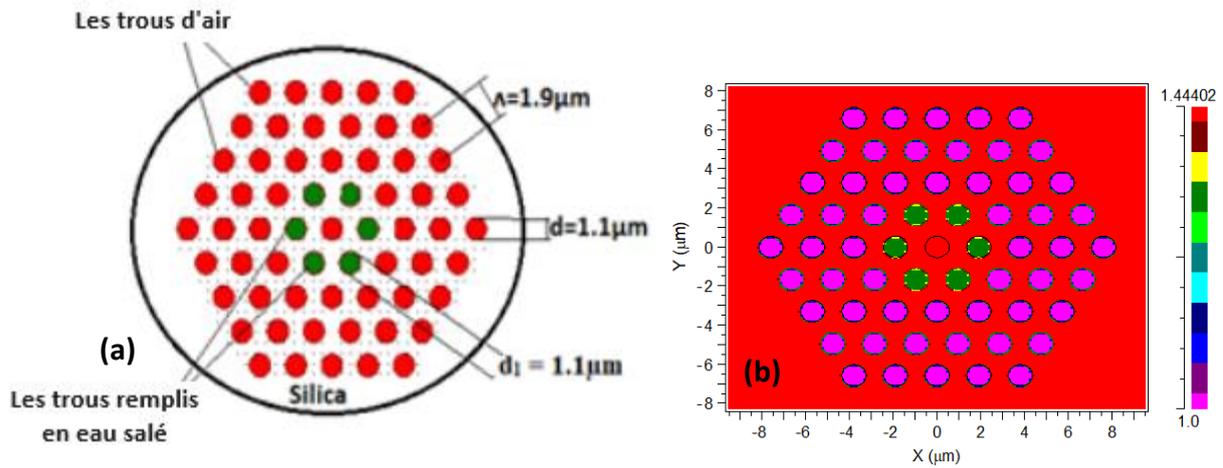
réfraction de l'eau de mer. Pour une meilleure compréhension, la relation entre l'indice de réfraction de l'eau de mer, la température ambiante de l'eau de mer et la salinité de l'eau de mer peut être décrite comme suit [29] :

$$\begin{aligned} n_{eau}(S, T, \lambda) = & 1.3140 + 1.779 \times 10^{-4} - 1.05 \times 10^{-6} T & \text{III. 4} \\ & + (1.6 \times 10^{-8} T^2)S - 2.02 \times 10^{-6} T \\ & + \frac{15.868 + 0.01155S - 0.00423T}{\lambda} - \frac{4382}{\lambda^2} \\ & + \frac{1.1455 \times 10^{-6}}{\lambda^3} \end{aligned}$$

S représente la concentration de salinité, où 1 PSU équivaut à 1 gramme de sel dissous dans 1 litre d'eau (g/l), ou "unité de salinité pratique" (% ou PSU). T représente la température de l'eau en Celsius °C. Nous montrons le lien entre l'indice de réfraction de l'eau de mer et les longueurs d'onde à une température fixe de 30 °C.

Nous avons simulé une fibre à cristaux photoniques RTIM fabriquée à partir de la silice, avec un indice de réfraction  $n_{silice}$ . Cette fibre se compose d'un arrangement régulier d'anneaux de trous d'air dont l'indice de réfraction  $n_{air}=1$  de dimensions microniques, alignés parallèlement à l'axe de propagation z dans le plan (xy). Nous avons introduit de l'eau salée dans le premier avec un indice de réfraction  $n_{eau}$ .

Les dimensions des trous dans le premier anneau sont de  $d_1=1.1 \mu\text{m}$ , tandis que dans les autres anneaux, ils sont de  $d=1.1 \mu\text{m}$ , avec un pas de  $\Lambda=1.9 \mu\text{m}$ . La figure III.10 (a) présente une section transversale de la PCF proposée. En réalité, le choix de la structure de la fibre prend en considération divers objectifs, notamment la minimisation de la dispersion, l'optimisation de la polarisation et l'augmentation de la sensibilité. La figure III.10 (b) représente le profil d'indice de la PCF, qui est l'outil qui cartographie les différents indices de réfraction des composants de la structure simulée de la PCF.



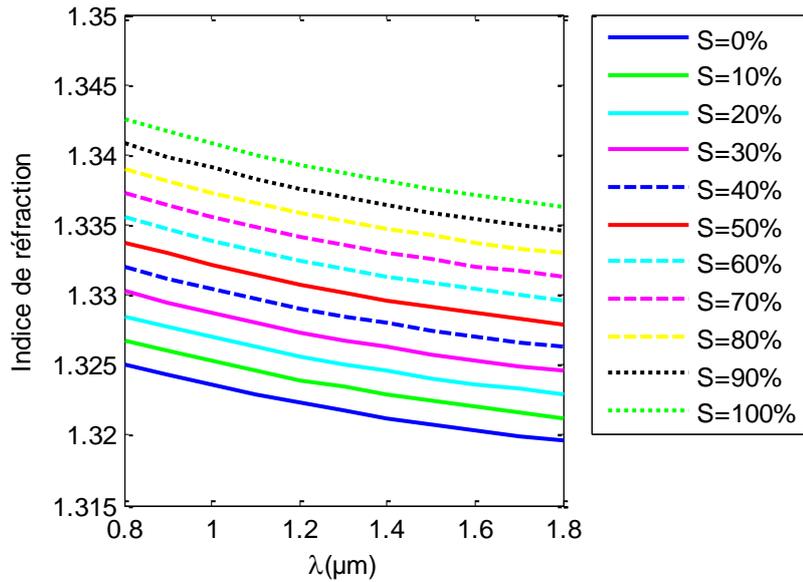
**Figure III. 10** (a) une section transversale et (b) le profil des indices de la fibre proposée

#### I.4.2. Résultats et interprétations

Le fonctionnement du capteur de salinité repose sur l'interaction entre les trous remplis de liquide et la gaine. Lorsque la lumière se propage dans le cœur, elle crée un champ évanescent qui traverse la région de la gaine pour atteindre les trous. Nous avons étudié la variation des dispersions à différentes concentrations d'eau salé injectée dans des trous d'air PCF.

Nous avons commencé la simulation en utilisant une approche numérique pour examiner comment modifier les valeurs de salinité affecte la dispersion. En ajustant les pourcentages de salinité de 0% à 100%, la dispersion en fonction de la longueur d'onde a été calculée pour démarrer la simulation en utilisant des méthodes numériques.

Il est important de noter que l'indice de réfraction de l'eau salé est inférieur à celui de la silice. La figure III.11 montre la variation de l'indice de réfraction de l'eau salée en fonction de la longueur d'onde pour les différentes concentrations (de 0 à 100 %). Cela montre que l'augmentation de la concentration de salinité dans l'eau de mer augmente l'indice de réfraction.



**Figure III. 11** L'indice de réfraction de l'eau salé en fonction de longueur d'onde pour des différentes concentrations de la salinité

La formule de sensibilité exprime la relation entre la valeur de sortie d'un capteur et sa valeur d'entrée, en tenant compte des facteurs qui l'influencent. Dans notre cas, la sensibilité est indiquée par la formule :

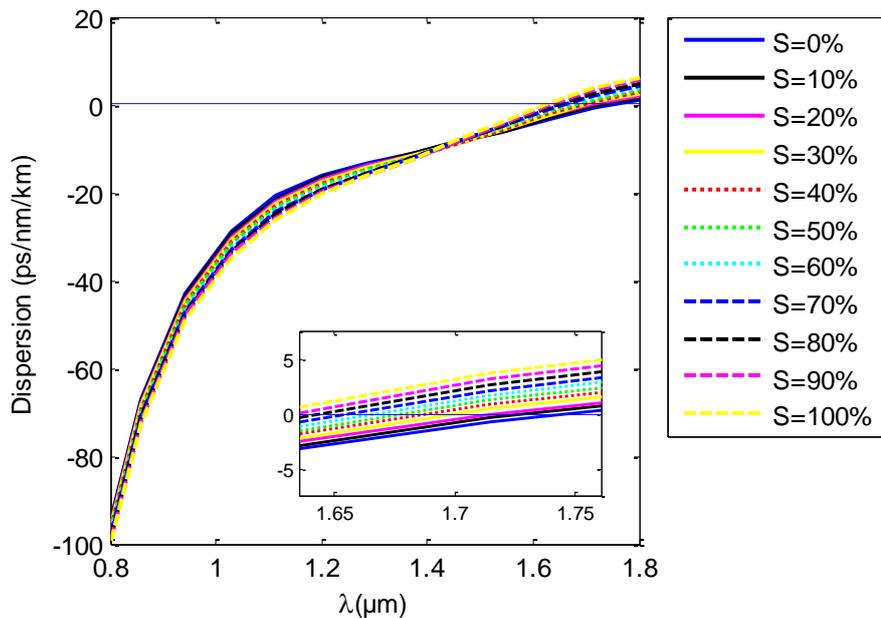
$$S(ps/nm/km/psu) = \frac{\Delta \text{Dispersion}}{\Delta \text{Concentration de la salinité}} \quad \text{III. 5}$$

Un nouveau capteur basé sur les fibres à cristal photonique (PCF) est proposé pour quantifier la salinité. Les échantillons à analyser, qui sont de l'eau salée, seront injectés à différentes concentrations dans les anneaux perforés de la PCF où ils agissent comme des noyaux liquides. Pendant ce temps, la simulation du phénomène a été effectuée numériquement. À divers débits d'injection des concentrations d'eau de mer dans la PCF, la variation des dispersions a été étudiée, étant inférieure à celle de la silice, l'indice de réfraction de l'eau de mer.

#### III.4.2.1. Premier anneau infiltré de l'eau de mer :

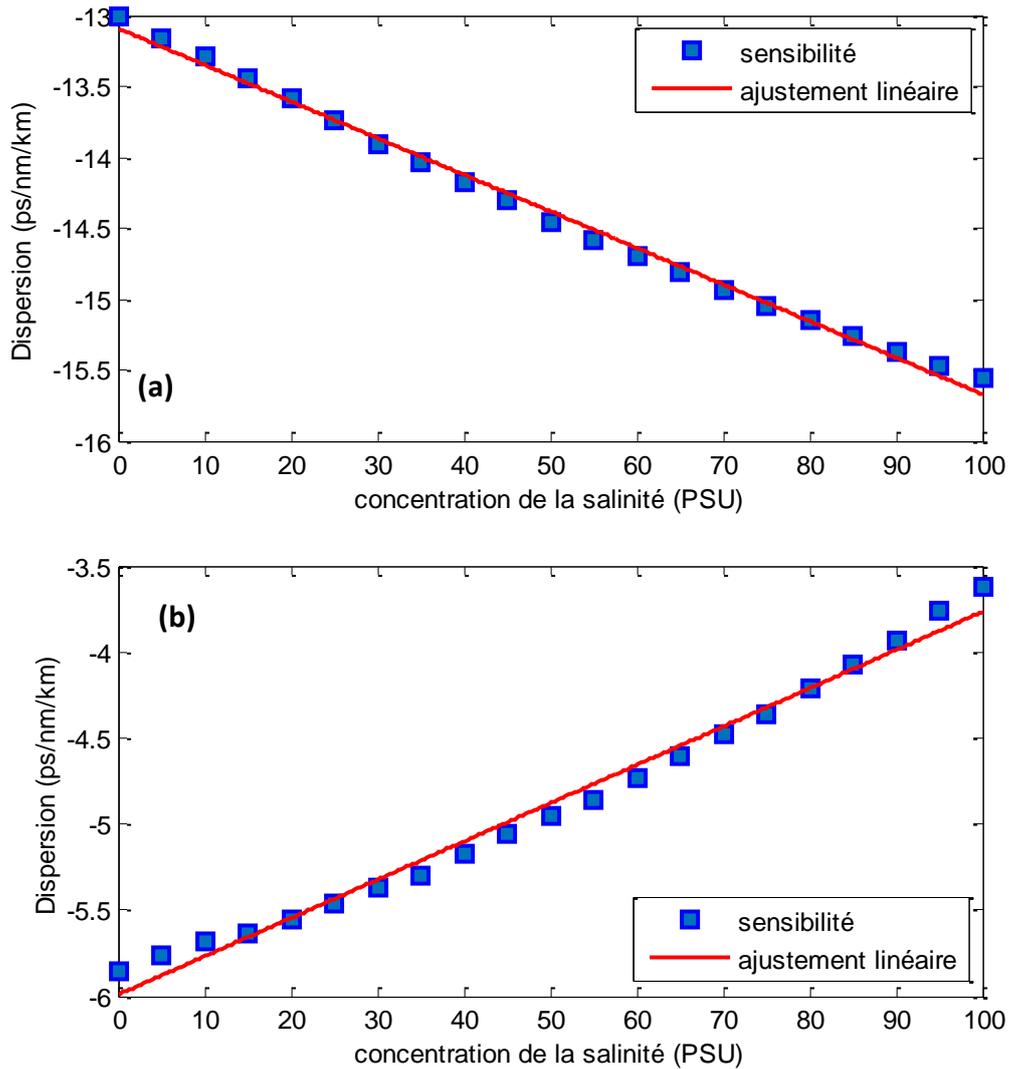
Pour atteindre une sensibilité élevée, nous avons examiné les caractéristiques de dispersion du capteur proposé en utilisant des techniques de modélisation numérique. La Figure III.12 montre la variation de la dispersion des structures PCF en fonction de la longueur d'onde de 0,8 μm à 1.8 μm pour différentes valeurs de salinité. Nous remarquons que lorsque la concentration de la salinité augmente, le tracé de dispersion tend vers des valeurs positives.

En variant la concentration, nous calculons la dispersion pour observer les différents résultats. Il est évident que la dispersion varie en fonction de la concentration. Ainsi, la dispersion dépend des concentrations en eau de mer, ce qui rend notre PCF très sensible à la salinité. De plus, la dispersion chromatique est négative sur une large plage de longueurs d'onde, de 0,8  $\mu\text{m}$  à environ 1,6  $\mu\text{m}$ . Ces valeurs négatives de dispersion peuvent compenser la dispersion habituelle des fibres monomodes conventionnelles. En conséquence, notre capteur de salinité proposé peut être adapté aux applications de communication.



**Figure III. 12** Variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde

Comme démontré par les analyses présentées, il est clair que la concentration de sel dans l'eau influence sur l'indice de réfraction. Ainsi, la salinité peut être indirectement estimée en mesurant cet indice. En conséquence, la concentration de sel dans la solution peut être déterminée en détectant le signal optique transmis ou réfléchi. Pour répondre aux éventuels problèmes liés à la mesure de la salinité, nous avons calculé la sensibilité de la salinité de notre capteur à PCF à deux longueurs d'onde souvent utilisées dans les systèmes de maintenance des fibres optiques : 1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ .



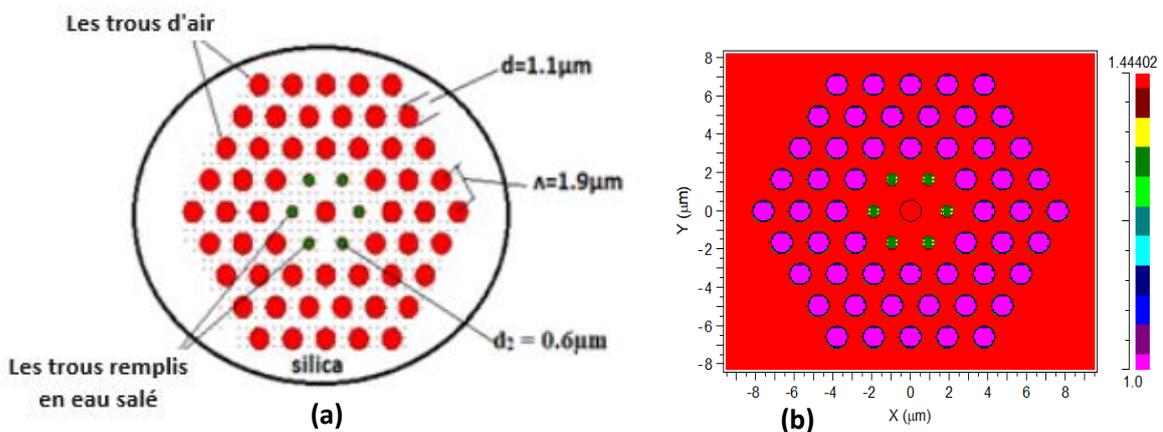
**Figure III. 13** (a) La sensibilité à  $1.3 \mu\text{m}$ . (b) La sensibilité à  $1.55 \mu\text{m}$ .

Après avoir représenté graphiquement la dispersion en fonction de la salinité à deux longueurs d'onde particulières à cette première étape, nous avons pu déterminer les valeurs de sensibilité du capteur en fonction de la PCF infiltrée avec de l'eau salée. Les figures III.13(a et b) montrent la variation de la dispersion aux longueurs d'onde suivantes : à  $1,3 \mu\text{m}$  et à  $1,55 \mu\text{m}$  en fonction de la salinité pour la PCF proposée. On peut remarquer que la variation de la dispersion est proportionnelle à la concentration de la salinité. Ce qui signifie : une augmentation de la salinité entraîne une augmentation des valeurs de dispersion.

Pour calculer la sensibilité de ce capteur, nous avons déterminé la tangente à partir de l'ajustement linéaire des tracés ci-dessus à chaque valeur de longueur d'onde. Nous avons obtenu une valeur de sensibilité égale à  $0.025805 \text{ (Ps/nm/km)/PSU}$  à une longueur d'onde de  $\lambda=1,3 \mu\text{m}$ , puis à  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$  la sensibilité  $S=0.022247 \text{ (Ps/nm/km)/PSU}$ .

### III.4.2.2. L'impact des paramètres opto-géométriques sur les performances de détection

Pour améliorer les capacités de détection recommandées de la PCF, nous avons analysé numériquement l'effet de la modification d'un paramètre opto-géométrique. La figure III. 14(a) montre une vue en coupe de la PCF microstructurée, où le diamètre des trous du premier anneau a été modifié. Dans cette structure, les paramètres de la première PCF sont maintenus. Le diamètre des trous dans le premier anneau est  $d_2=0.6\mu\text{m}$ , rempli d'eau de mer. Tous les diamètres des trous d'air sont  $d=1.1\mu\text{m}$  et la variation du pas entre eux est  $\Lambda=1.9\mu\text{m}$ . En utilisant l'équation (III.2) de Sellmeier, nous avons déterminé le fond de la PCF en fonction de la dispersion chromatique calculée de la silice fondue. Le profil d'indice est illustré dans la figure III.14(b).



**Figure III. 14** (a) une section transversale une modification du diamètre  $d_1$  et (b) le profil des indices de la fibre proposée.

Nous avons employé des méthodes numériques pour simuler les caractéristiques de la PCF. La figure III.15 montre l'effet de la variation de la dispersion chromatique. On observe une légère modification lorsque la salinité change. Ainsi, il existe un lien entre la dispersion et la concentration en sel, démontrant que la PCF peut servir de capteur de salinité.

Nous examinons l'effet de cette modification dans la structure. Nous simulerons la dispersion chromatique aux mêmes longueurs d'onde choisies dans la première section, à savoir  $1,3\mu\text{m}$  et  $1,55\mu\text{m}$ , les deux longueurs d'onde de télécommunication.

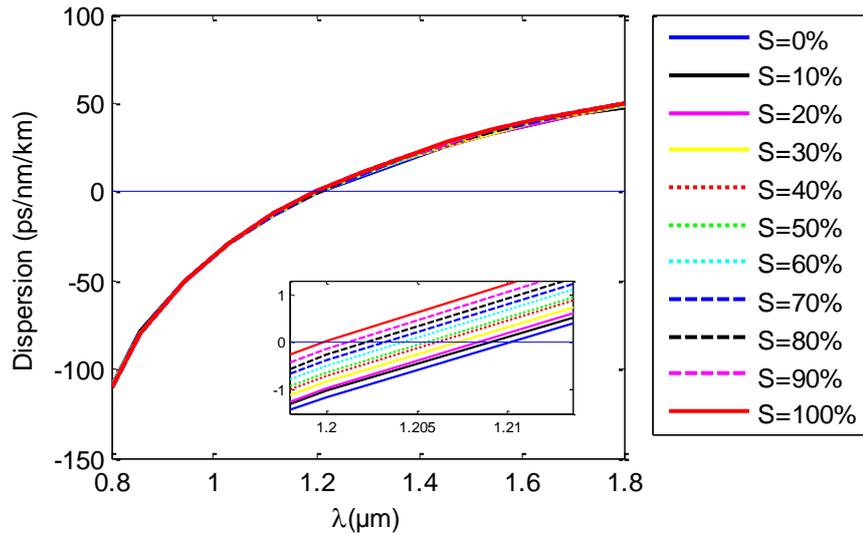


Figure III. 15 La variation de la dispersion en fonction de la longueur d'onde de 0,8  $\mu\text{m}$  à 1,8  $\mu\text{m}$  avec différents niveaux de sel dans l'eau.

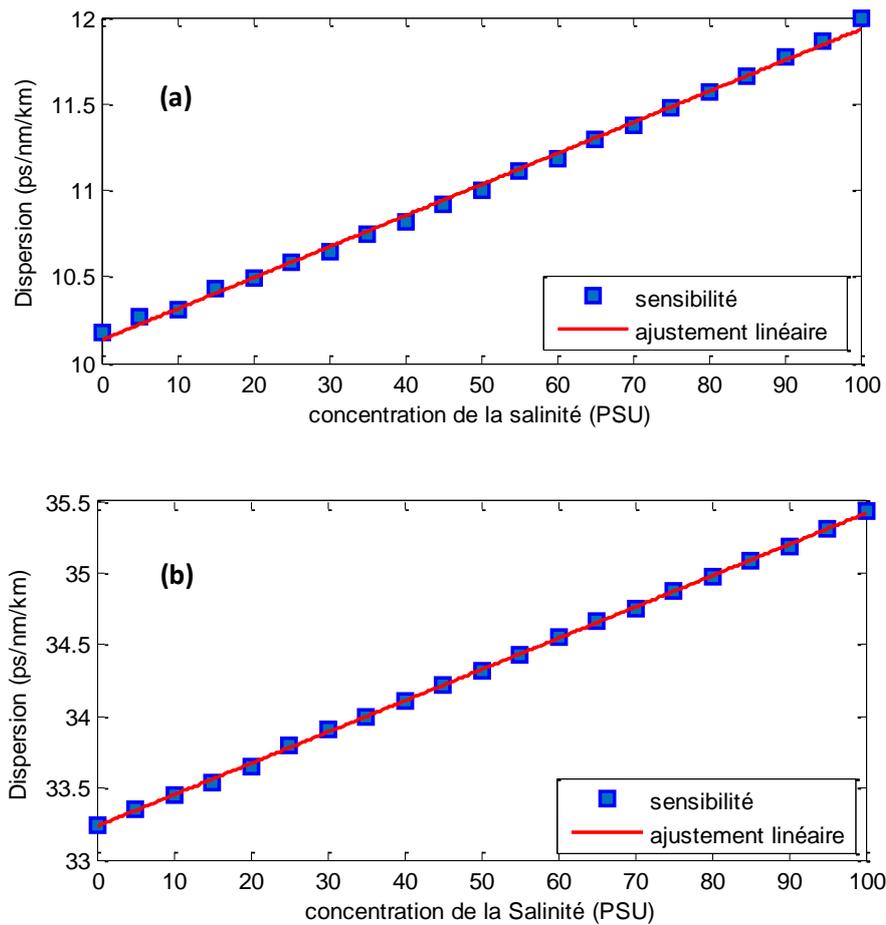
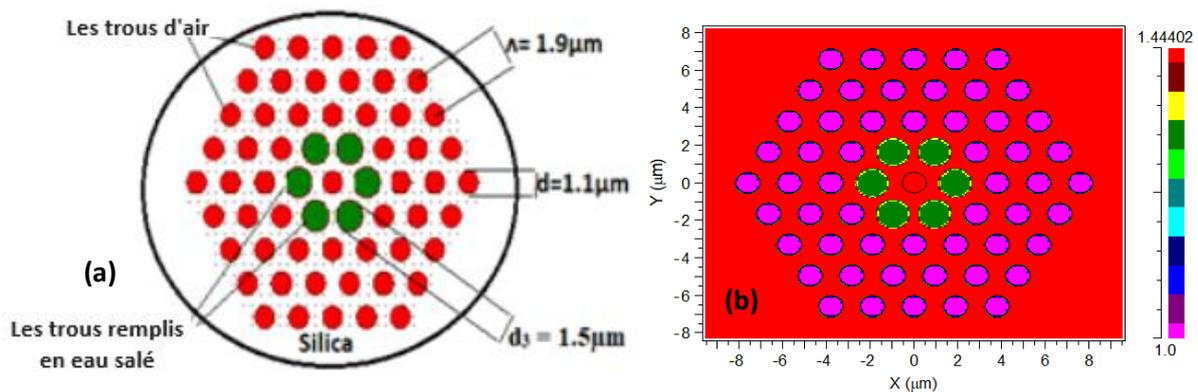


Figure III. 16 (a) La sensibilité à 1.3 $\mu\text{m}$ . (b) La sensibilité à 1.55 $\mu\text{m}$ .

Tout d'abord, la figure III.16(a) représente les résultats estimés pour la longueur d'onde  $1.3\mu\text{m}$ . Les performances du capteur sont significativement impactées par un changement dans le diamètre des trous initiaux de l'anneau. La sensibilité à la salinité est d'environ  $0,017966$  (ps/nm/km)/PSU. Dans la figure III.16(b), l'effet du diamètre des trous du premier anneau sur la dispersion est également étudié pour la longueur d'onde de  $1,55\mu\text{m}$ . En appliquant un ajustement linéaire, la sensibilité de la salinité est obtenue à environ  $0,021818$  (ps/nm/km)/PSU.

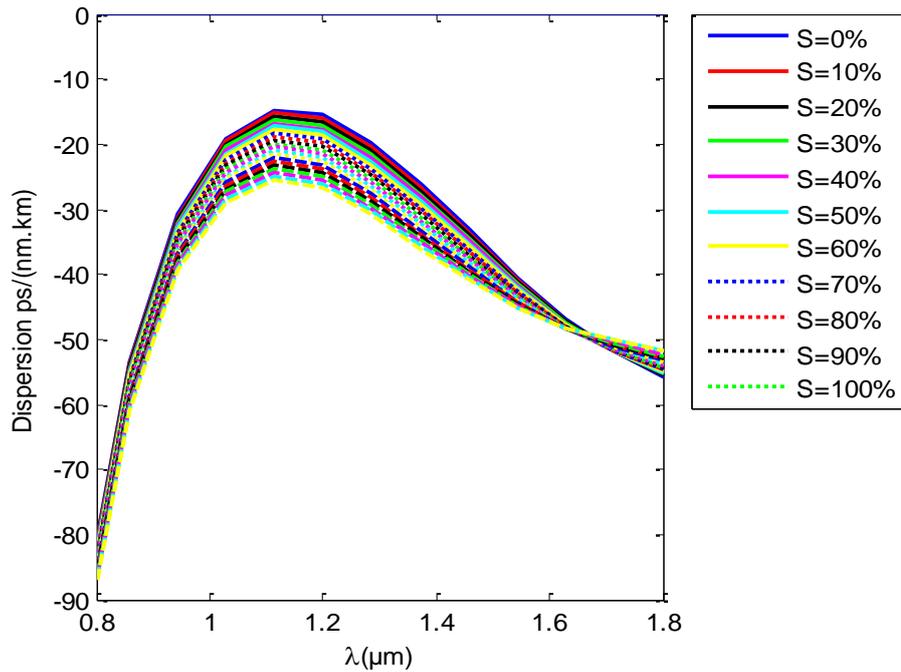
#### III.4.2.3. Les multiples fonctionnalités de la fibre à cristaux photoniques

Il est essentiel d'examiner l'impact de la variation des diamètres des trous d'air sur les performances du capteur. Les figures III. 17(a) et III. 17(b) présentent respectivement la représentation schématique de la formation de la PCF et le profil d'indice. Dans cette conception, tous les trous d'air sont espacés avec un pas constant de  $1,9\mu\text{m}$ , et leur diamètre est de  $1,1\mu\text{m}$ . Le diamètre des trous du premier anneau est  $d_3=1,5\mu\text{m}$ , où l'eau salée est injectée. L'équation (III.2) de Sellmeier détermine la silice fondue comme matériau de fond de la fibre



**Figure III. 17** (a) Section transversale de la PCF lorsque  $d_3=1.5\mu\text{m}$ . (b) Le profil d'indice de la structure.

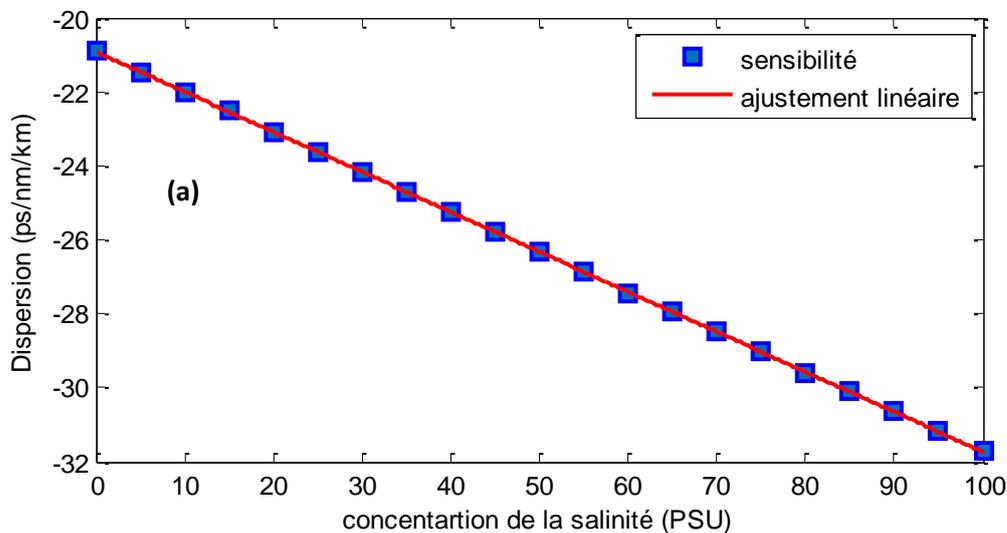
La figure III.18 décrit la variation de la dispersion chromatique en fonction des longueurs d'onde avec des différentes concentrations de salinité dans l'eau. Il est évident que notre capteur présente une sensibilité élevée pour détecter la salinité. De plus, la dispersion chromatique est clairement négative, de  $0,8\mu\text{m}$  à  $1,8\mu\text{m}$ . Ces valeurs de dispersion négative importantes peuvent être utilisées pour compenser la dispersion anormale des fibres monomodes conventionnelles. Il est évident qu'une dispersion extrêmement négative peut être obtenue sur la bande de télécommunication pour l'ensemble optimal de paramètres, offrant une bonne compensation de la dispersion.



**Figure III. 18** La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde avec différents niveaux de sel dans l'eau.

Comme précédemment, nous choisirons deux longueurs d'onde différentes pour évaluer la sensibilité de ce capteur de salinité : 1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ . Nous examinerons la variation de la dispersion chromatique à chacune de ces longueurs d'onde.

La figure III. 19(a) présente la sensibilité calculée et en appliquant un ajustement linéaire, nous obtenons une valeur de 0,10815 (ps/nm/km)/PSU. La sensibilité, indiqué sur la figure III.19(b), est ensuite calculée pour  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ . En appliquant un ajustement linéaire, la valeur moyenne de la sensibilité de la salinité peut être établie à 0,0455964 (ps/nm/km)/PSU.



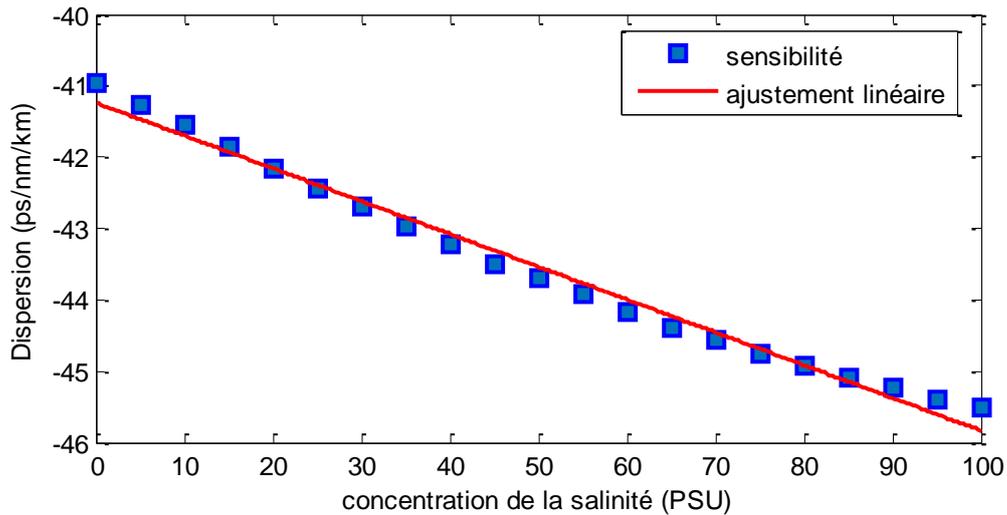


Figure III. 19 (a) La sensibilité à 1.3  $\mu\text{m}$ . (b) La sensibilité à 1.55  $\mu\text{m}$ .

Comme démontré dans les sections précédentes, en calculant la dispersion, nous pouvons déterminer la sensibilité de la salinité en variant la concentration en sel de 0 % à 100 %. Nous évaluons les performances de notre capteur proposé en examinant trois structures différentes et en calculant la sensibilité pour deux longueurs d'onde, 1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ . Les résultats obtenus à partir des simulations précédentes, basés sur le décalage de la dispersion, sont présentés dans le tableau III.2.

Tableau III. 2 Les résultats des sensibilités pour différentes longueurs d'onde

Paramètre de la Structure	Longueur d'onde	Sensibilité (ps/nm/km)/PSU)
$\Lambda=1.9\mu\text{m}$ $d=1.1\mu\text{m}$ $d_1=1.1\mu\text{m}$	1.3 $\mu\text{m}$	0.025805
	1.55 $\mu\text{m}$	0.022247
$\Lambda=1.9\mu\text{m}$ $d=1.1\mu\text{m}$ $d_2=0.5\mu\text{m}$	1.3 $\mu\text{m}$	0.017966
	1.55 $\mu\text{m}$	0.021818
$\Lambda=1.9\mu\text{m}$ $d=1.1\mu\text{m}$ $d_3=1.5\mu\text{m}$	1.3 $\mu\text{m}$	0.10815
	1.55 $\mu\text{m}$	0.045964

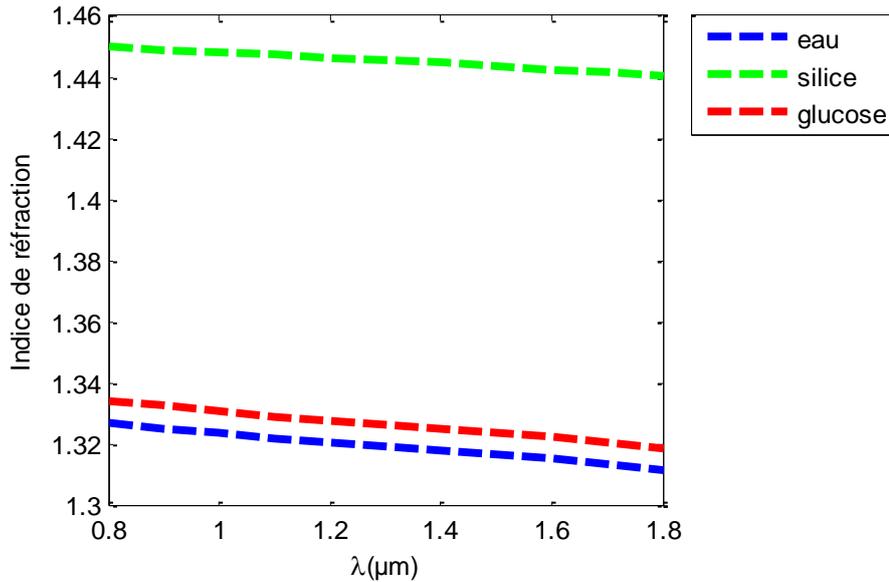
La sensibilité la plus élevée aux différentes concentrations de sel dans l'eau est de 0,017966 (ps/nm/km)/PSU pour  $\lambda=1,3 \mu\text{m}$  et de 0,021818 ps/(nm.km)/PSU pour  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ . Par

conséquent, la plus grande sensibilité aux variations de concentrations de sel peut être modulée en ajustant les paramètres de conception de la PCF.

En conclusion, et en se basant sur les résultats de notre recherche, il est clair que la modification d'un paramètre dans la structure est importante pour obtenir de meilleurs résultats. Ce capteur présente un faible coût et une structure simple. Par conséquent, le capteur suggéré peut être utilisé pour la détection de la salinité lorsque ses paramètres sont améliorés. De plus, le capteur suggéré peut être utilisé comme un outil polyvalent, à la fois comme capteur pour mesurer la salinité ou comme une PCF pour une communication à faible perte.

### III.5. Conception d'un capteur de glucose

Ces dernières années, les applications des fibres à cristaux photoniques dans le domaine de la bio-détection ont connu une augmentation significative. Des travaux de recherche importants sont en cours pour aborder des aspects tels que la perte de confinement, la biréfringence, la dispersion et la perte de flexion des fibres à cristaux photoniques (PCF) [30-32]. En plus de cela, les applications de détection des fibres microstructurées sont très prometteuses pour détecter divers composés chimiques et biologiques dans le domaine de la sécurité alimentaire [33, 34]. En raison de leur précision de détection étendue, de leur petite taille, de leur rentabilité et de leur flexibilité de fabrication, les fibres à cristaux photoniques sont également prometteuses dans les domaines de la sécurité environnementale [35-37] et de la pathologie médicale [38]. En termes d'utilisation biomédicale, la PCF peut déterminer les concentrations de glucose. L'indice de réfraction est connu pour avoir un impact sur les niveaux de glucose. Dans cette partie, nous utilisons des solutions de glucose pour étudier et déterminer la sensibilité du capteur par rapport aux variations de la dispersion chromatique. Notre approche consiste à utiliser une fibre à cristal photonique (PCF) conçue pour la détection des concentrations de glucose. La méthode Beamprop (BPM) a été utilisée pour simuler la fibre à cristal photonique suggérée et explorer l'efficacité de la détection du glucose en substituant l'air injecté dans les trous par de l'eau tout en conservant la structure, le pas et le diamètre constants. L'objectif principal de ces configurations structurelles est d'obtenir un degré élevé de sensibilité.



**Figure III. 20** L'indice de réfraction de l'eau, de la silice et de glucose en fonction de la longueur d'onde.

La fibre est constituée de la silice fondue, et son indice de réfraction aux différentes longueurs d'onde peut être calculé en utilisant l'équation de Sellmeier [22]. Cette équation (III.2) établit un lien empirique entre l'indice de réfraction  $n$  et la longueur d'onde  $\lambda$  pour un milieu transparent spécifique. La simulation implique une gamme de concentrations de 0% à 30% pour étudier la dispersion chromatique et les niveaux de glucose. La dispersion chromatique est calculée de Sellmeier, qui est couramment utilisée pour caractériser les matériaux (indice de réfraction), les guides d'ondes et la dispersion chromatique. Pour calculer la dispersion, une technique analytique a été utilisée. L'indice de réfraction du glucose est exprimé dans l'équation suivante [39]:

$$n_{glucose} = n_{eau} + aC \quad \text{III. 6}$$

Où :  $a = 0.00143$  est une constante.  $C$  est la concentration de glucose, et  $n_{eau}$  qui est présenté sur l'équation (III.4), est l'indice de réfraction de l'eau lorsque la température  $T = 25^\circ\text{C}$  et la pression  $P = 2\text{bars}$ .

La fibre proposée a été conçue pour surveiller la concentration de glucose. La figure III.20 illustre les indices de réfraction de la silice, de l'eau et de l'analyte de test qui est le glucose par rapport à une longueur d'onde de micromètre allant de  $0,8 \mu\text{m}$  à  $1,8 \mu\text{m}$ .

III.5.1. Description de la structure de la PCF

Une structure de PCF avec cinq anneaux a été conçue pour obtenir une sensibilité élevée. La figure III.21 (a) décrit une coupe transversale de la fibre proposée. La gaine est composée de cinq couches de trous d'air en forme hexagonal. Les trous d'air sont disposés périodiquement avec un diamètre  $d=1.5\mu\text{m}$ .

Tableau III. 3 Les paramètres géométriques de la structure proposée.

Paramètres	valeurs ( $\mu\text{m}$ )
Pitch $\Lambda$	3
Diamètre $d$	1.5
Le diamètre de la gaine externe	125
Le diamètre du revêtement	245

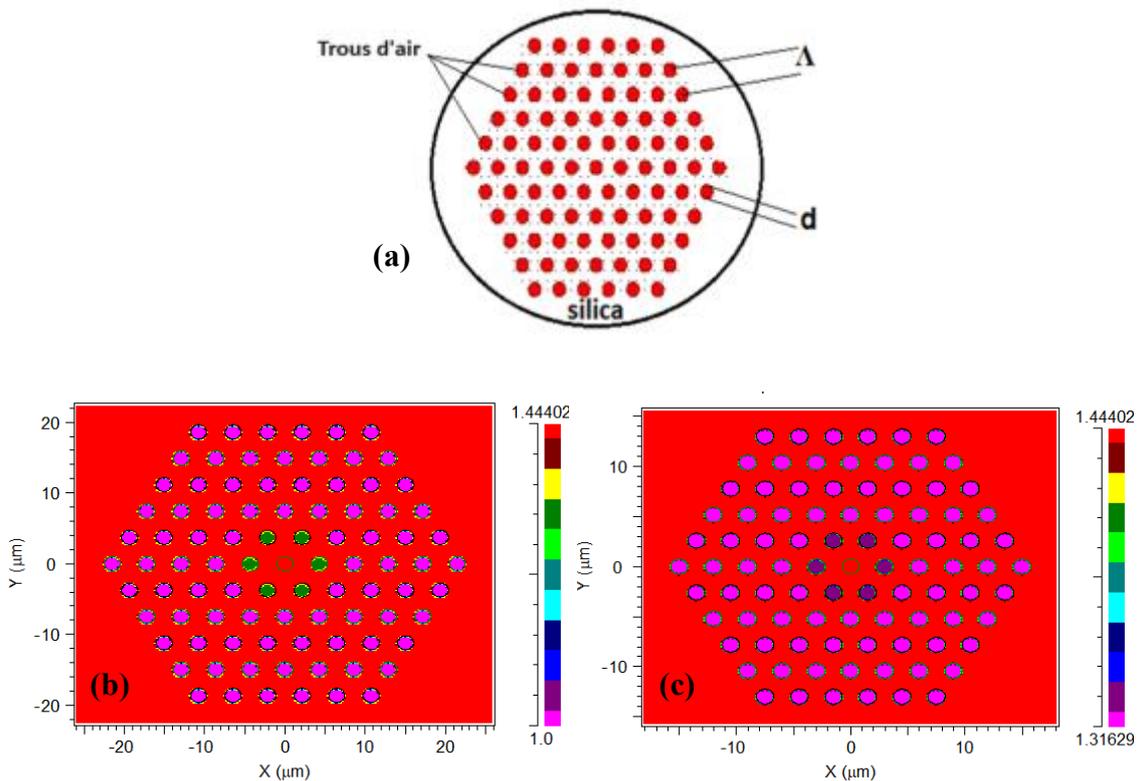


Figure III. 21 (a) la fibre proposée (b) le profil d'indice de la fibre proposée ou les trous sont remplis de l'air (c) le profil d'indice de la fibre proposée ou les trous sont remplis de l'eau

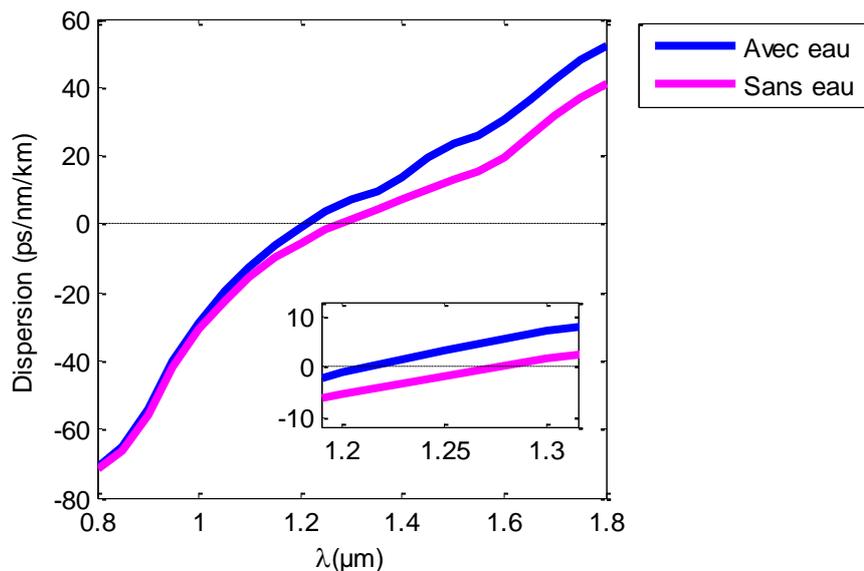
La constante de pas  $\Lambda$  des trous d'air distribués régulièrement est choisie comme  $\Lambda=3\mu\text{m}$ . Les paramètres spécifiques de notre PCF conçu sont présentés dans le Tableau III.3.

Les trous, qui sont infiltrés par l'analyte à analyser qui est le glucose, sont pris avec le même diamètre  $d$ , et cet analyte est rempli dans le premier anneau de la structure. Le profil de l'indice de la structure est représenté dans la figure III.21(b). La figure III.21(c) présente le profil d'indice de la structure proposée lorsque l'air est remplacé par de l'eau de sorte que les trous sont remplis d'eau.

### III.5.2. Résultats et interprétations

Dans cette section, nous examinons les caractéristiques optiques de la fibre proposée pour évaluer ses capacités à détecter les concentrations de glucose. En premier lieu, nous évaluons les performances du capteur PCF en utilisant des méthodes numériques. Différentes concentrations d'analyte de glucose ont été introduites dans le premier anneau de la fibre microstructurée. Pour étudier les variations et les effets de l'infiltration d'eau sur le PCF, nous utiliserons la méthode BPM pour simuler la dispersion du PCF avec et sans eau. Nous avons mesuré la dispersion le long d'une plage de longueurs d'onde de  $0,8 \mu\text{m}$  à  $1,8 \mu\text{m}$  en modifiant les concentrations de glucose, puis nous avons calculé le décalage de dispersion à des longueurs d'onde spécifiques ( $1,1 \mu\text{m}$ ,  $1,3 \mu\text{m}$  et  $1,55 \mu\text{m}$ ) pour obtenir des sensibilités.

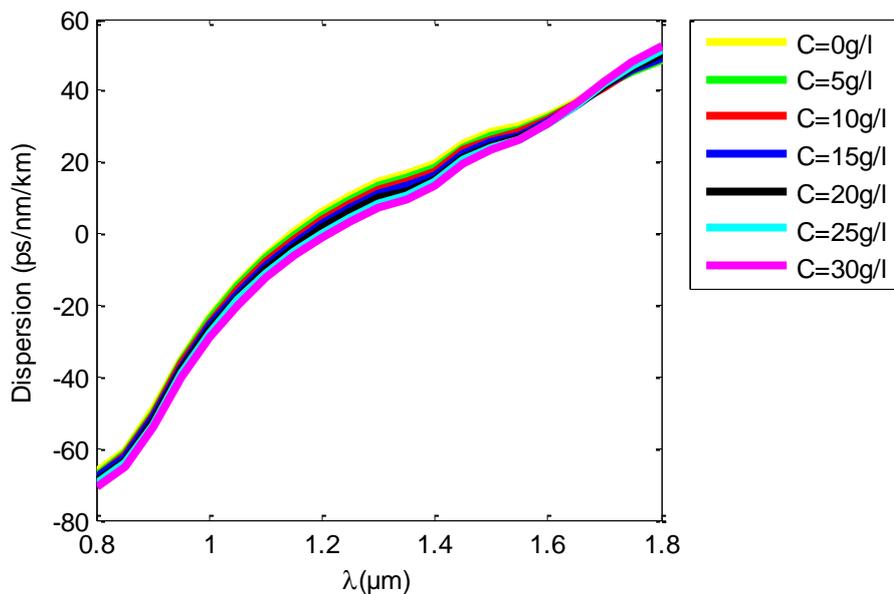
La variation des dispersions a été étudiée à différentes concentrations de glucose injectées dans le premier anneau du PCF. L'indice de réfraction du glucose est inférieur à celui de la silice.



**Figure III. 22** La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde avec et sans eau infiltré dans les trous.

Comme indiqué dans la Figure III.22, l'analyse de la dispersion chromatique a été effectuée sous une concentration de glucose de  $C=30$  g/l, avec et sans eau remplie dans les trous. On observe que la longueur d'onde du zéro de dispersion (ZDW) est d'environ  $1,2 \mu\text{m}$  lorsque les trous du PCF sont remplis d'air. Cependant, la ZDW a changé à  $1,3 \mu\text{m}$  après l'ajout d'eau dans les trous d'air. Cette observation nous conduit à conclure que l'infiltration d'eau dans les trous a des effets et des influences sur la dispersion.

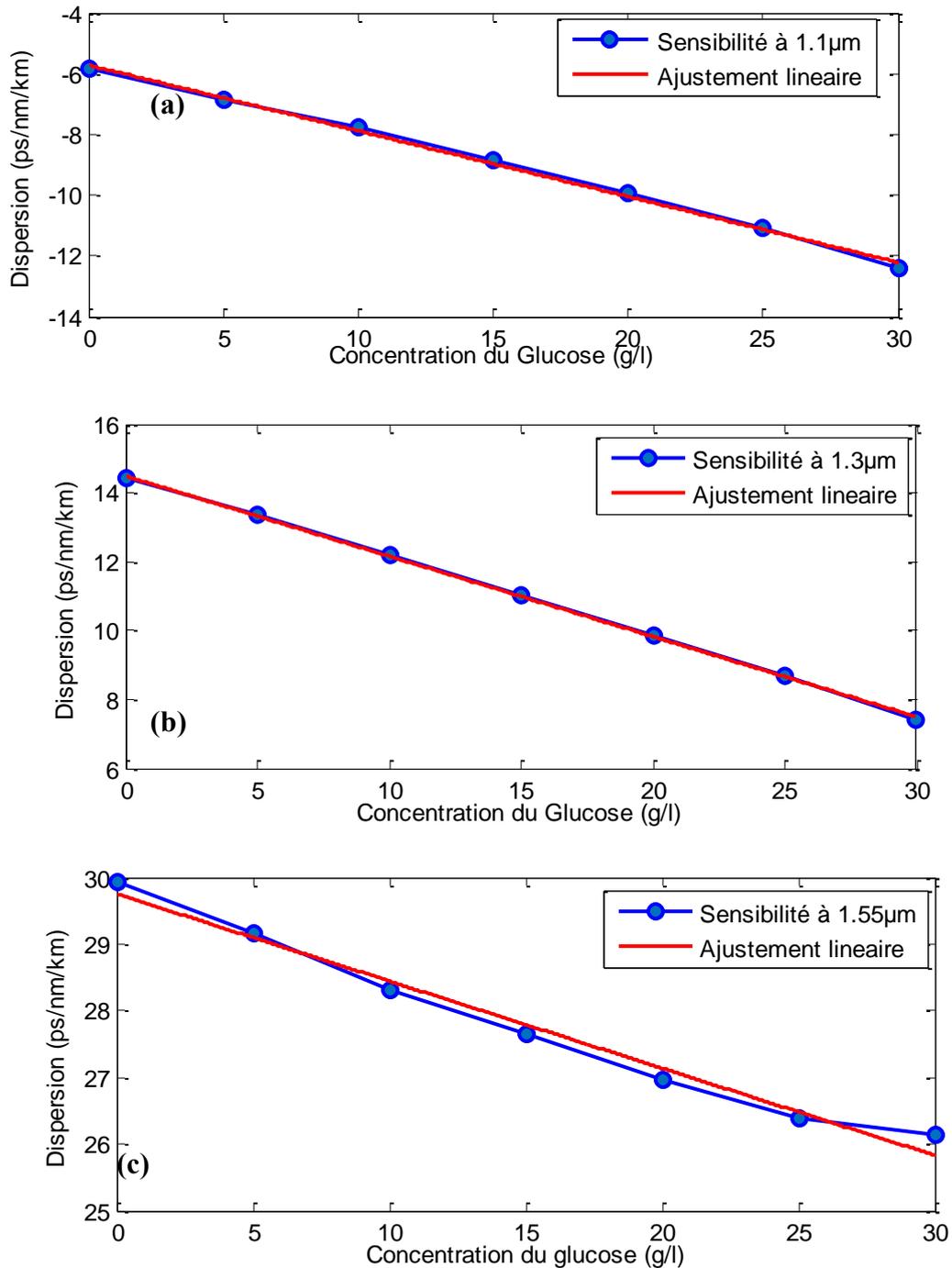
Ensuite, nous avons conçu un capteur à fibre microstructurée et évalué sa sensibilité aux concentrations variables de glucose, en comparant les performances lorsque les trous sont remplis d'air et lorsqu'ils sont infiltrés d'eau. Cette analyse éclaire l'impact de l'eau sur la dispersion chromatique et, par conséquent, met en évidence une amélioration notable de la sensibilité pour le capteur proposé.



**Figure III. 23** La variation de la dispersion chromatique à des différentes concentrations de glucose quand les trous sont remplis d'air.

La Figure III.23 affiche la dispersion chromatique dans la plage de longueur d'onde de  $0,8 \mu\text{m}$  à  $1,8 \mu\text{m}$  pour des concentrations de glucose allant de 0 à 30 %, avec un pas de 5 %. Elle illustre le changement de la dispersion chromatique causé par l'infiltration de glucose dans les trous tandis que les trous restants sont remplis d'air. Un léger changement de la dispersion chromatique se produit à mesure que la concentration de glucose augmente.

Cela suggère qu'il y a une relation entre la dispersion et la concentration de glucose, la dispersion dépend de la présence de glucose. Cela démontre l'applicabilité potentielle du PCF en tant que capteur de glucose.



**Figure III. 24** (a) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.1 $\mu$ m. (b) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.3 $\mu$ m. (c) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.55 $\mu$ m.

Nous remarquons que la dispersion augmente avec l'augmentation de la longueur d'onde. De plus, des différentes concentrations de glucose peuvent influencer directement la variation de la distribution de l'indice de réfraction de la PCF, entraînant des changements dans la dispersion. Il est évident que les modifications de la concentration de glucose correspondent à des changements dans la dispersion, ce qui peut être exploité pour informer le développement et la fonctionnalité de la détection du glucose ou d'autres capteurs biochimiques.

La dispersion chromatique a été sélectionnée pour calculer la sensibilité de ce capteur à ce stade. La sensibilité a été déterminée comme suit :

$$S((ps/nm/km)/g/l) = \frac{\Delta \text{Dispersion}}{\Delta \text{Concentration du glucose}} \quad \text{III. 7}$$

Comme indiqué dans la Figure III.24 (a), la sensibilité peut être calculée à l'aide d'un ajustement linéaire pour être de 0,21649 (ps/nm/km)/(g/l) quand la longueur d'onde  $\lambda=1.1 \mu\text{m}$ . La Figure III.24 (b) présente la variation de la dispersion en fonction de la concentration de glucose. Nous pouvons obtenir une sensibilité de 0,23324 (ps/nm/km)/(g/l) lorsque  $\lambda=1,3 \mu\text{m}$ .

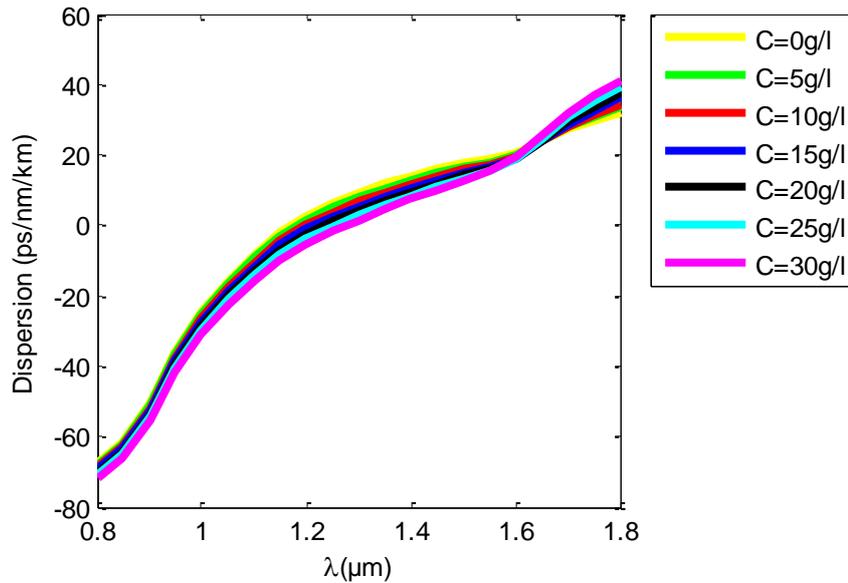
La dispersion chromatique est représentée dans la Figure III.24 (c) où nous avons varié la concentration de glucose à la longueur d'onde  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ . La sensibilité moyenne peut atteindre 0,13071 (ps/nm/km)/(g/l).

Par la suite, nous utiliserons la méthode BPM pour simuler la dispersion du PCF avec infiltration d'eau. L'objectif est d'investiguer les disparités et les effets causés par l'introduction d'eau dans le PCF. Sur la base de cette étude, nous avons calculé la sensibilité de notre capteur nouvellement développé, en utilisant des méthodes numériques pour simuler le décalage de la dispersion chromatique. À partir de la figure III.25, on peut observer un décalage dans les valeurs de dispersion en changeant les concentrations de glucose.

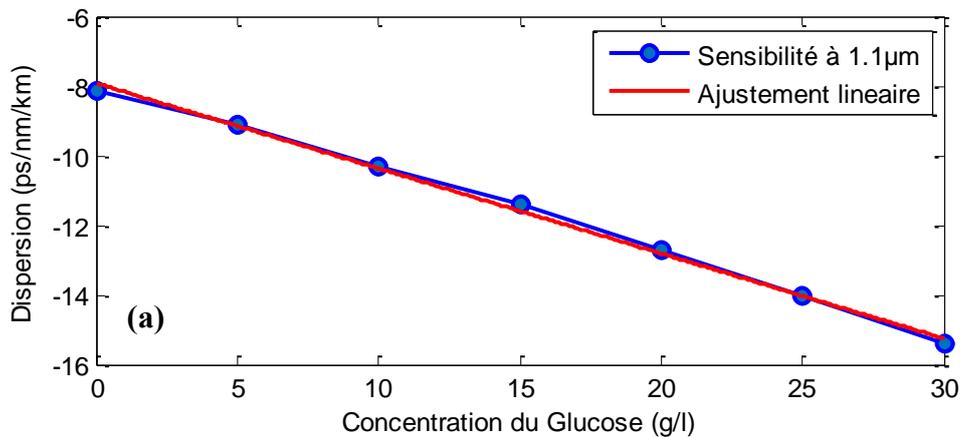
Nous avons observé à partir de la figure III.26 (a) la variation de la dispersion à la longueur d'onde  $\lambda=1,1 \mu\text{m}$  en fonction de la concentration. La sensibilité peut être calculée et en appliquant l'ajustement linéaire, elle peut être calculée à 0,24424 (ps/nm/km)/(g/l).

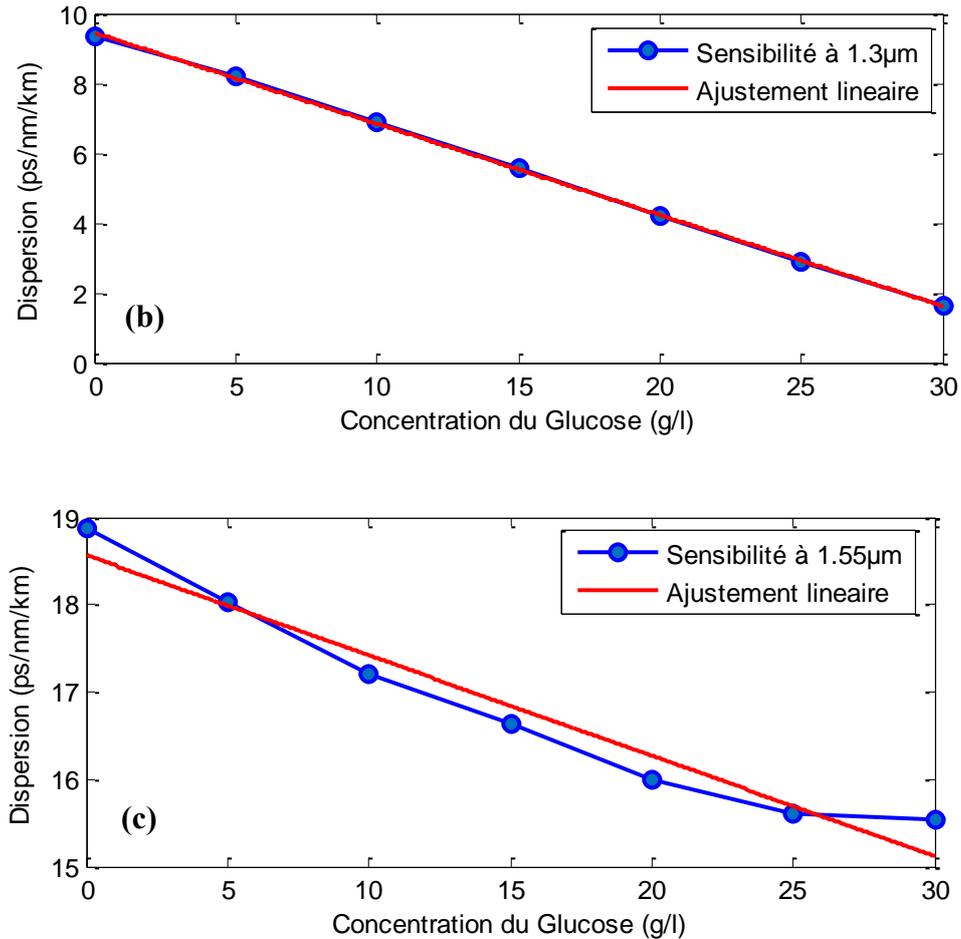
La figure III montre la variation de la dispersion chromatique à la longueur d'onde 1,3  $\mu\text{m}$ . Comme on peut le voir dans la figure III.26 (b) et en appliquant l'ajustement linéaire, nous pouvons calculer la sensibilité et obtenir 0,26082 (ps/nm/km)/(g/l).

La figure III.26 (c) démontre la variation de la dispersion avec la concentration de glucose à 1,55  $\mu\text{m}$  et il peut être obtenu que la sensibilité moyenne est de 0,110493 (ps/nm/km)/(g/l).



**Figure III. 25** La variation de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'onde à des différentes concentrations du glucose quand les trous sont remplis de l'eau.





**Figure III. 26** (a) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.1 μm. (b) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.3 μm. (c) la dispersion chromatique en fonction de la concentration du glucose à la longueur d'onde de 1.55 μm.

Le Tableau III.4 présente les résultats de sensibilité optimisée pour la surveillance du glucose. La comparaison des performances de notre capteur de glucose est rapportée. Le capteur de glucose présente la plus haute précision de détection de 0,11493 (ps/nm/km)/(g/l) lorsque les trous sont infiltrés avec de l'eau à 1,55 μm. Notre fibre proposée a démontré une amélioration significative de la sensibilité en remplaçant l'air par de l'eau. Notre capteur est simple dans sa conception et peut être considéré comme un candidat fiable pour la détection du glucose. De plus, le capteur de glucose est très précis et très réactif à l'indice de réfraction de la solution. Par conséquent, on peut conclure que le capteur proposé avec des paramètres optimisés peut être utilisé pour la détection du glucose.

**Tableau III. 4** La sensibilité du capteur pour différentes longueurs d'onde de 1,1  $\mu\text{m}$ , 1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ .

Longueurs d'onde		1.1 $\mu\text{m}$	1.3 $\mu\text{m}$	1.55 $\mu\text{m}$
Sensibilité (ps/nm/km)/(g/l)	Trous d'air	0.21649	0.23324	0.13071
	Trous remplis d'eau	0.24424	0.26082	0.11493

### III.6. Conception d'un capteur de Malaria

La malaria reste une épidémie répandue qui touche des millions de personnes et entraîne plus d'un million de décès chaque année. Un diagnostic précoce et précis de la malaria est crucial pour fournir un traitement rapide et réduire les taux de mortalité. La malaria est causée par un organisme parasitaire appelé protozoaire qui infecte à la fois le foie et les globules rouges et est transmis par les moustiques *Anopheles* [40]. En général, les globules rouges (RBCs) ont une distribution homogène de l'indice de réfraction, tandis que les RBCs infectés présentent un indice de réfraction non homogène dans le cytoplasme de la cellule. Ainsi, les différences dans l'indice de réfraction et la morphologie entre les RBCs sains et infectés sont des éléments cruciaux pour le diagnostic de maladies telles que la malaria et l'anémie [41]. Après plusieurs jours d'incubation dans le foie, les parasites de stade sanguin sont libérés, infectent les globules rouges et subissent un développement asexué avant de faire éclater les cellules. Les symptômes de la malaria sont provoqués par cette étape du cycle de vie du parasite, tels que la fièvre, les frissons et les maux de tête [42]. Les modifications structurelles qui se produisent dans les globules rouges (RBCs) pendant le développement asexué sont généralement divisées en trois stades [43] :

- La phase à l'étape de l'anneau, qui dure 24 heures et présente des parties en forme d'anneau.
- La phase trophozoïte, entre 24 et 36 heures.
- La phase schizonte, entre 36 et 48 heures.

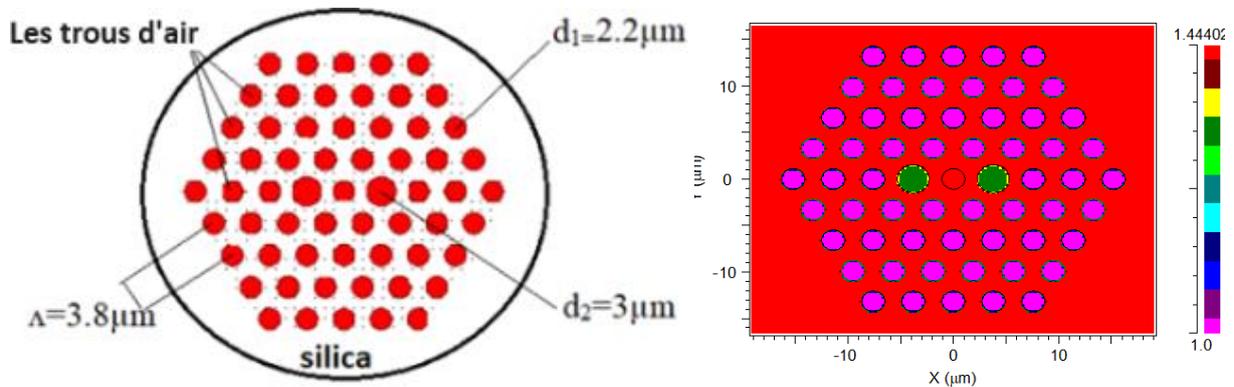
Il existe plusieurs méthodes de diagnostic du paludisme accessibles qui présentent des limites en termes de sensibilité, de précision, de temps de traitement, de rentabilité, d'intensité de main-d'œuvre et de détection précoce du paludisme [44]. Récemment, l'utilisation de fibres à cristaux photoniques (PCFs) a suscité un intérêt important dans le domaine de la fabrication optique et de la recherche. Les variations de l'indice de réfraction sont un moyen efficace de détecter les infections sanguines. Par conséquent, dans la conception des cristaux photoniques

biomédicaux, l'indice de réfraction joue un rôle crucial [45]. Les capteurs à fibres à cristaux photoniques (PCF) ont la capacité d'être employés pour élaborer des biocapteurs destinés au diagnostic de diverses maladies.

Dans cette partie, nous simulerons un capteur à fibre à cristaux photoniques (PCF) pour la détection du Malaria. Le capteur utilise deux trous remplis d'un échantillon de sang, et leurs résultats d'indice de réfraction (RI) et de dispersion chromatique sont exploités pour améliorer la sensibilité du biocapteur. Nous mesurons le décalage de la dispersion chromatique du capteur proposé avec différentes concentrations de globules rouges normaux (RBCs) et de RBCs infectés afin de déterminer sa sensibilité au paludisme. Les résultats démontrent la capacité du capteur PCF à détecter le paludisme avec une sensibilité élevée.

### III.5.1. Description de la structure de la PCF

La nouvelle structure proposée dans cette étude est constituée de silice pure et d'un réseau hexagonal de trous d'air s'étendant sur toute la longueur de la structure. La figure III. 27(a) illustre la section transversale de la PCF. La période  $\Lambda = 3.8 \mu\text{m}$  représente la maille de la région de gaine, définie par la distance entre les trous d'air,  $d_1 = 2.2 \mu\text{m}$  est le diamètre des trous d'air de la structure, et  $d_2 = 3 \mu\text{m}$  est le diamètre des deux trous situés horizontalement autour du cœur de la fibre à cristaux photoniques, infiltrés avec de l'hémoglobine HGB.



**Figure III. 27** (a) Le capteur PCF proposé et (b) l'indice de profil de la structure proposée.

Le profil d'indice de la structure proposée est représenté dans la figure 1b. Il est clair que notre fibre à cristaux photoniques (PCF) proposée est conçue avec quatre anneaux de trous d'air ( $n_{\text{air}} = 1$ ). Nous avons apporté une modification dans le premier anneau en remplaçant deux trous, qui ont ensuite été infiltrés avec de l'hémoglobine ( $n_{\text{HGB}}$ ). Le matériau de base de la structure

est la silice ( $n_{\text{silica}}$  selon l'équation (III.2) de Sellmeier [21]). Cette configuration spécifique nous permet d'obtenir certaines propriétés optiques essentielles pour notre application.

Nous avons employé la méthode BPM pour concevoir et étudier le capteur proposé. Nous avons sélectionné la silice fondue comme matériau de base pour la conception du capteur, car elle est adaptée à une utilisation ultraviolette (UV) à infrarouge proche et offre une résistance thermique et chimique supérieure par rapport à d'autres matériaux en verre[46].

Pour calculer la dispersion chromatique de la PCF, nous avons utilisé l'équation de Sellmeier [22] pour déterminer la PCF à cœur solide proposée. L'indice de réfraction des solutions d'hémoglobine en fonction de la concentration d'hémoglobine HGB est déterminé à l'aide de l'équation suivante[47] :

$$n - n_{\text{water}} = \beta \times C_{\text{HGB}} \quad \text{III. 8}$$

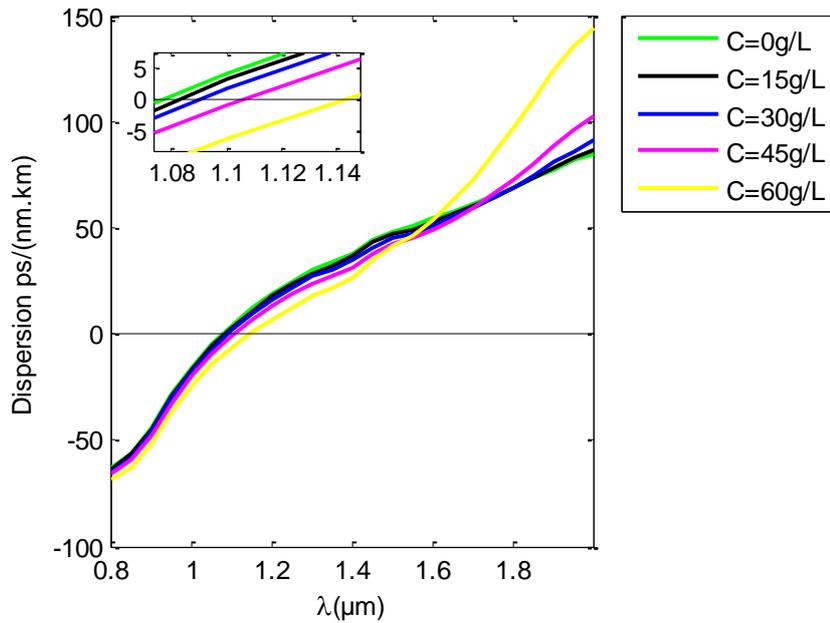
Où  $\beta$  est l'accroissement spécifique de la réfraction en dL/g, égal à 0,0019 dL/g [47],  $C_{\text{HGB}}$  est la concentration de HGB en g/L et  $n_{\text{water}}$  est l'indice de réfraction de l'eau (équation (III.1))

### III.5.2. Résultats et interprétations

Nous avons utilisé la méthode BPM pour simuler le capteur proposé et étudier ses propriétés de dispersion afin d'atteindre une sensibilité élevée. La figure III.28 illustre la variation des courbes de dispersion chromatique dans la plage de longueurs d'onde pour différentes concentrations, allant de 0 g/L à 60 g/L avec un intervalle de 10 g/L.

Nous avons observé que le changement de concentration (C) provoquait un déplacement de la longueur d'onde de dispersion nulle (ZDW) de 1,08  $\mu\text{m}$  à 1,14  $\mu\text{m}$ . Cela suggère qu'en augmentant la concentration d'hémoglobine dans la structure de la PCF, nous avons pu déplacer la longueur d'onde de dispersion nulle. La dispersion de longueur d'onde fait référence à la variation de la vitesse de propagation de la lumière en fonction de sa longueur d'onde. En augmentant la concentration d'hémoglobine dans notre structure de PCF, nous avons probablement introduit un changement dans l'indice de réfraction du matériau à l'intérieur de la fibre. Ce changement d'indice de réfraction peut modifier les propriétés de guidage de la fibre, y compris ses caractéristiques de dispersion. En ajustant la concentration d'hémoglobine (de 0 g/L à 60 g/L avec un pas de 10 g/L), nous avons réussi à déplacer la longueur d'onde de dispersion nulle vers une valeur différente. Cela présente des implications importantes pour les

applications de détection, car cela peut améliorer la sensibilité du capteur à des longueurs d'onde spécifiques. Les résultats ont montré que, à mesure que la concentration augmentait, la dispersion chromatique diminuait dans la plage de longueurs d'onde de 0,8  $\mu\text{m}$  à 1,6  $\mu\text{m}$ . Cependant, les courbes ont changé de comportement après  $\lambda = 1,6 \mu\text{m}$ , et la dispersion simulée a augmenté avec des concentrations plus élevées.

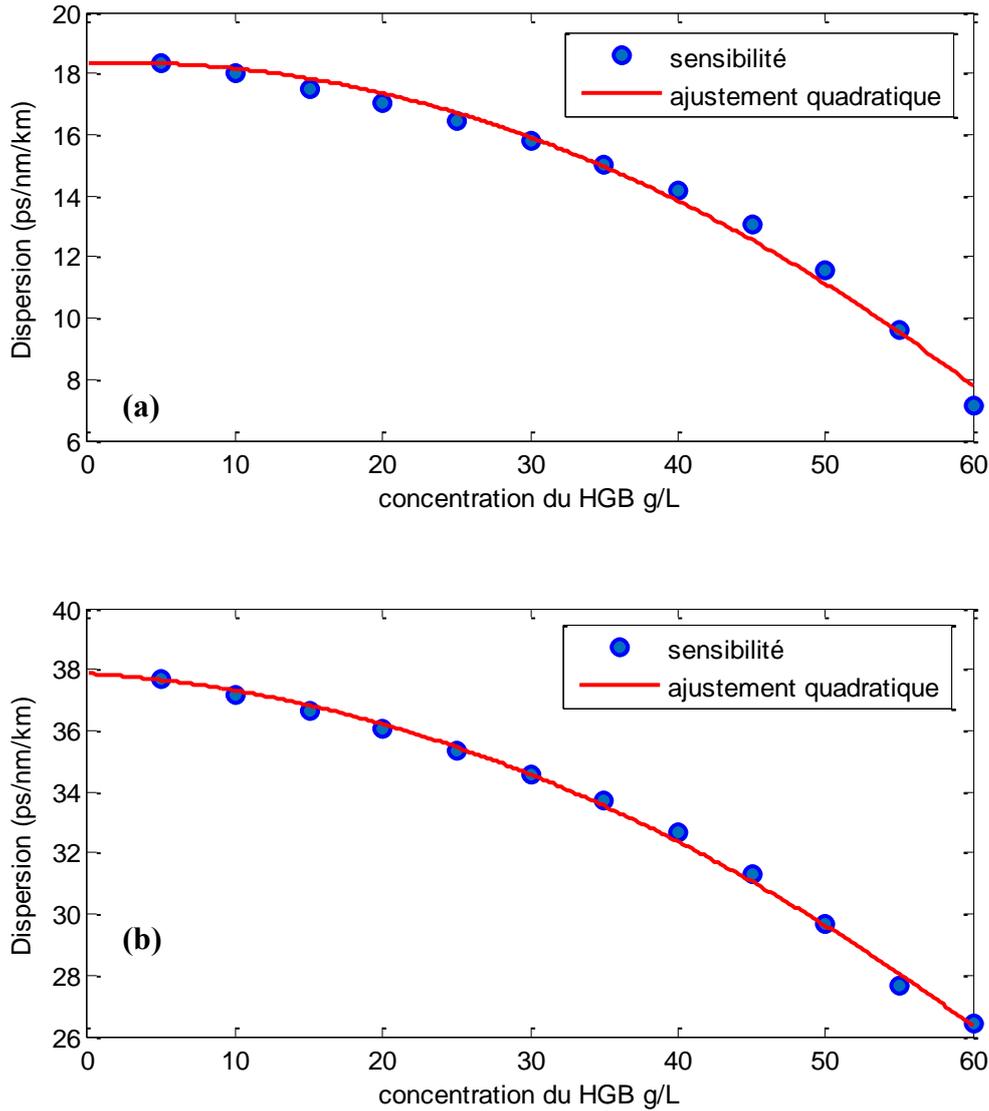


**Figure III. 28** La variation de la dispersion chromatique en fonction des longueurs d'onde avec différentes concentrations de 0 à 60 g/L.

Pour évaluer l'utilité de ce capteur proposé, nous devons calculer la sensibilité qui peut être obtenue en utilisant la formule [48] :

$$S((ps/nm/km)/(g/L)) = \frac{\Delta D}{C_{HGB}} \quad \text{III. 9}$$

Ici,  $\Delta D$  représente le décalage de la dispersion et  $\Delta C_{HGB}$  représente la variation de la concentration d'hémoglobine HGB.



**Figure III. 29** Les variations de la dispersion en fonction des différentes concentrations du HGB. (a) Sensibilité à 1.2μm. (b) Sensibilité à 1.4μm.

L'interaction entre les trous d'air et ceux remplis de liquide est fondamentale pour le fonctionnement de ce capteur. Un champ évanescent est généré par la lumière qui se propage du cœur à travers la région de gaine vers les trous. Nous avons étudié la variation des dispersions pour différentes vitesses d'injection d'eau de mer dans la PCF, étant donné que l'HGB a un indice de réfraction inférieur à celui de la silice.

Dans cette étude, nous choisirons deux longueurs d'onde différentes, 1,2 μm et 1,4 μm, et nous évaluerons la sensibilité de ce capteur PCF proposé à chaque longueur d'onde.

La figure III. 29(a) illustre la variation de la dispersion chromatique en fonction de la concentration d'HGB, avec des courbes obtenues par interpolation polynomiale de Lagrange à

l'aide du logiciel MATLAB. Pour adapter la courbe de dispersion en fonction de la concentration d'HGB de manière quadratique, nous avons utilisé la méthode d'ajustement quadratique. Pour gérer les valeurs tangentes négatives résultantes, nous avons pris la valeur absolue, car notre intérêt était de connaître la différence de dispersion entre deux concentrations successives. La sensibilité calculé a une valeur moyenne de 0,232 (ps/nm/km)/(g/L). La figure III. 29(b) présente l'ajustement quadratique de la dispersion en fonction des différentes concentrations d'HGB. La sensibilité peut ainsi être calculée comme étant de 0,185 (ps/nm/km)/(g/L).

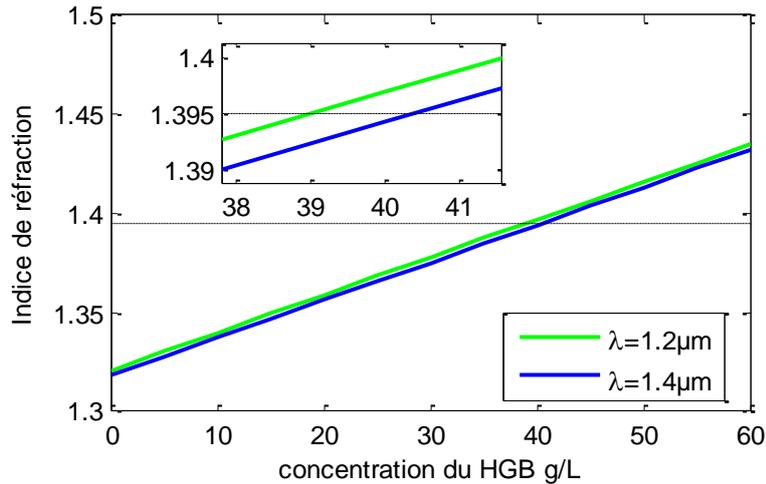
On peut constater que nos résultats lorsque  $\lambda = 1,2 \mu\text{m}$  sont meilleurs que lorsque  $\lambda = 1,4 \mu\text{m}$ . Nous concluons que la PCF offre une sensibilité relative plus élevée, donc notre capteur proposé est performant pour la détection sanguine à  $1,2 \mu\text{m}$ .

Maintenant, nous examinons l'impact de la concentration sur l'indice de réfraction RI afin d'optimiser les paramètres du capteur pour le diagnostic du paludisme. La figure III.30 illustre la relation entre l'indice de réfraction de l'HGB et les concentrations d'HGB allant de 0 à 60 g/L. Le graphique montre une relation linéaire entre l'indice de réfraction et la concentration d'HGB.

Théoriquement, l'indice de réfraction effectif de l'HGB dépend de la variation de la concentration d'HGB. Nous pouvons observer directement à partir de la figure III.30 que lorsque l'indice de réfraction de l'HGB augmente, la concentration d'HGB augmente, ce qui signifie que l'IR est proportionnel à la concentration.

Selon [49], les indices de réfraction RI des globules rouges normaux, des globules rouges infectés dans les stades de l'anneau, des trophozoïtes et des schizontes sont respectivement de  $n=1,402, 1,395, 1,383$  et  $1,373$ . L'indice de réfraction RI des globules rouges infectés pour la phase de l'anneau, qui est la première étape du changement dans les globules rouges après l'infection, est de 1,395.

Pour les globules rouges infectés pendant la phase de l'anneau, qui représente la première étape du changement des globules rouges après l'infection, l'indice de réfraction (RI) est mesuré spécifiquement à 1,395. Cette valeur clé fournit des informations cruciales pour notre recherche.



**Figure III. 30** L'indice de réfraction du HGB en fonction de la concentration du HGB

Les résultats présentés dans la figure III.30 montrent deux courbes distinctes illustrant la relation entre l'indice de réfraction de l'HGB (RI) et sa concentration. Pour diagnostiquer efficacement le paludisme, nous avons soigneusement sélectionné l'indice de réfraction d'un globule rouge infecté pendant la phase de l'anneau, en le fixant à  $n=1,395$ . Notre capteur proposé, utilisant cette valeur sélectionnée, a montré des performances exceptionnelles dans le diagnostic du paludisme à une concentration d'HGB de 38 g/L, avec une longueur d'onde ( $\lambda$ ) de 1,2  $\mu\text{m}$ , et à une concentration d'HGB de 40 g/L, avec une longueur d'onde ( $\lambda$ ) de 1,4  $\mu\text{m}$ . Ces résultats soulignent le potentiel prometteur de notre approche pour un diagnostic précis et fiable du paludisme.

Le tableau III.5 présente la capacité du capteur que nous proposons à détecter le paludisme par rapport à des capteurs précédemment signalés qui ont également été utilisés à cette fin. Comme on peut le constater, contrairement aux autres efforts, notre approche utilise le décalage de la dispersion chromatique plutôt que l'indice de réfraction RI.

**Tableau III.5** : Comparaison de différents diagnostics de Malaria.

Référence	Différents diagnostics de Malaria	Sensitivity (pour la phase des anneaux)	Technique
[50]	SPR biosensor of Malaria detection	13714.29 nm/RIU	Surface plasmon resonance wavelength variation
[44]	One-dimensional PCF biosensor for Malaria diagnosis	495.73 nm/RIU	Variation of refractive index of blood sample
[51]	Malaria biosensors based on cavity PCF	741.3 nm/RIU	Nanocavity
[49]	Malaria diagnosis based on single elliptical channel PCF sensor	11,428.57 nm/RIU	Variation of Refractive index (RI) of red blood cells (RBCs)
<b>Cette étude</b>	Malaria diagnosis	0.232 ps/(nm.km)/(g/L)	Dispersion variation

### III.7. Conception d'un capteur chimique

Les fibres microstructurées peut être utilisées comme un capteur en remplissant un ou plusieurs trous avec différents analytes. Les chercheurs ont proposé une variété de méthodes pour l'injection de liquide. Cela le rend utile dans une variété d'industries. En tant que capteur chimique, l'une des utilisations les plus populaires du PCF dans le domaine de la détection, un groupe de chercheurs pionniers a introduit une variété de conceptions avec des performances variables au fil des années.

Les objectifs de l'étude actuelle sont d'évaluer l'indice de réfraction à des longueurs d'onde plus longues des différents solvants et d'étudier la variation de la dispersion chromatique de divers solvants sur une plage de longueurs d'onde. À ce concept, une nouvelle structure de PCF est créée pour maintenir d'excellentes propriétés optiques. Les résultats de l'indice de réfraction et de la dispersion chromatique sont explorés dans la plage de longueurs d'onde de 1,1  $\mu\text{m}$  à 1,8  $\mu\text{m}$ , et les analytes de test pour cette étude sont le benzène, le toluène, le xylène et l'éthanol, comparés à l'air.

De nombreuses équations de dispersion peuvent être utilisées pour définir le spectre d'indice de réfraction. On utilisera l'équation (III.2) de Sellmeier [22]. La formule de dispersion de Sellmeier peut être utilisée pour calculer les indices de réfraction dans les régions des spectres de dispersion normale et anormale [52].

L'indice de réfraction ( $n_{eth}$ ) de l'éthanol pour des différentes longueurs d'onde ( $\lambda$ ) est reporté dans le tableau III.6 [53]. Et l'équation a été calculée par Matlab et est donnée par :

$$n_{eth} = 0.0075758\lambda^2 - 0.025485\lambda + 1.3728 \quad \text{III. 10}$$

**Tableau III. 6** Indice de réfraction de l'éthanol pour différentes longueurs d'onde [53].

Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Indice de réfraction (Ethanol)
0.6	1.361
0.7	1.358
0.8	1.357
0.9	1.356
1	1.355
1.1	1.354
1.2	1.353
1.3	1.353
1.4	1.352
1.5	1.352
1.6	1.351

L'indice de réfraction  $n$  du benzène ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), du toluène ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ) et du xylène ( $\text{C}_8\text{H}_{10}$ ) a été mesuré à la température  $T$  et l'équation a été donnée par :

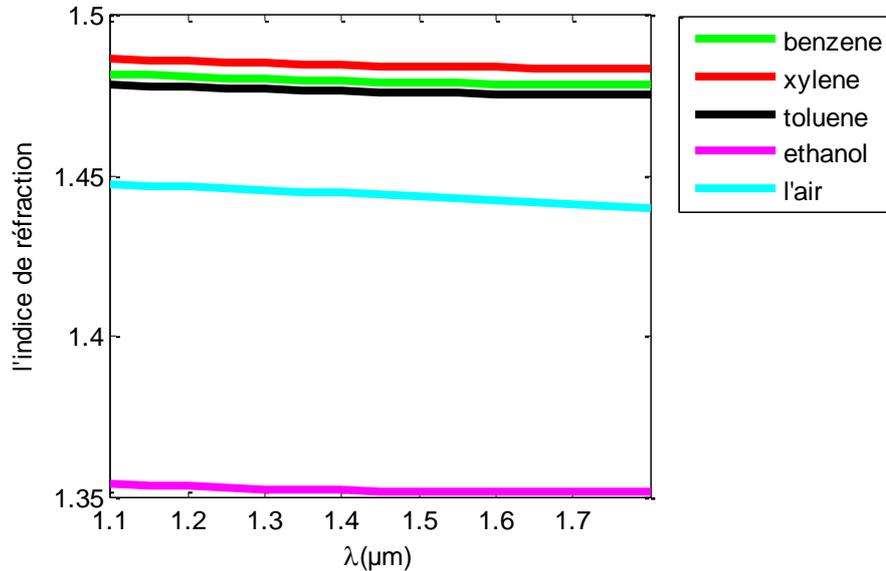
$$n_{\lambda}(T) = A + B.T \quad \text{III. 11}$$

Où  $n_{\lambda}(T)$  est l'indice de réfraction,  $A$  et  $B$  sont des constantes pour chaque liquide et longueur d'onde. Un ajustement linéaire fournit une représentation adéquate qui est cohérente avec la précision de nos données ; un polynôme du second ordre ne produit aucune amélioration significative [54].

Comme proposé par Bertie [55], la formule de Cauchy a été utilisée pour exprimer la dépendance en longueur d'onde de  $n$ , et la deuxième équation  $n(T, \lambda)$  a été construite sous la forme :

$$n(T, \lambda) = (a_0 + a_2 \cdot \lambda^{-2} + a_4 \cdot \lambda^{-4}) + (b_0 + b_2 \cdot \lambda^{-2}) \cdot T \quad \text{III. 12}$$

Où  $a_0$ ,  $a_2$ ,  $a_4$ ,  $b_0$  et  $b_2$  sont des constantes pour chaque liquide et le tableau III.6 résume les paramètres d'ajustement pour chaque système.



**Figure III. 31** L'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde pour le benzène, le xylène, le toluène, l'éthanol et l'air.

**Tableau III. 7** Les paramètres de l'équation pour le benzène, toluène, et le xylène [54].

Paramètres	Benzène	Toluène	Xylène
$a_0$	1.6566	1.6311	1.6237
$a_2$ (nm <sup>2</sup> )	$11.128 * 10^3$	$10.114 * 10^3$	$9.6463 * 10^3$
$a_4$ (nm <sup>4</sup> )	$3.0030 * 10^8$	$29002 * 10^8$	$2.8494 * 10^8$
$b_0$ (K <sup>-1</sup> )	$-6.0514 * 10^{-4}$	$-5.2970 * 10^{-4}$	$-4.7761 * 10^{-4}$
$b_2$ (nm <sup>2</sup> K <sup>-1</sup> )	-14.0904	-12.358	-11.046

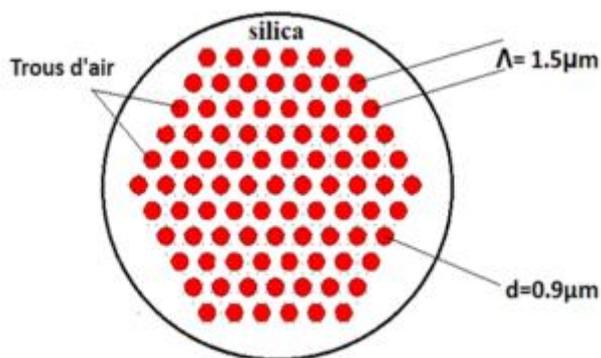
L'indice de réfraction a été utilisé pour étudier les propriétés de propagation du PCF. Cela est dû au fait que l'approche de l'indice de réfraction est une méthodologie numérique simple qui produit qualitativement les mêmes caractéristiques modales que le PCF.

La figure III.31 illustre le comportement typique de l'indice de réfraction pour les quatre liquides étudiés et l'air. Comme le montre la figure, l'indice de réfraction diminue lorsque la longueur d'onde augmente, pour l'air et tous les analytes sélectionnés : le benzène, le xylène, le toluène et l'éthanol. De plus, on peut remarquer que l'éthanol a l'indice de réfraction le plus bas, suivi de l'air, du toluène, du benzène et du xylène, qui ont un indice plus élevé.

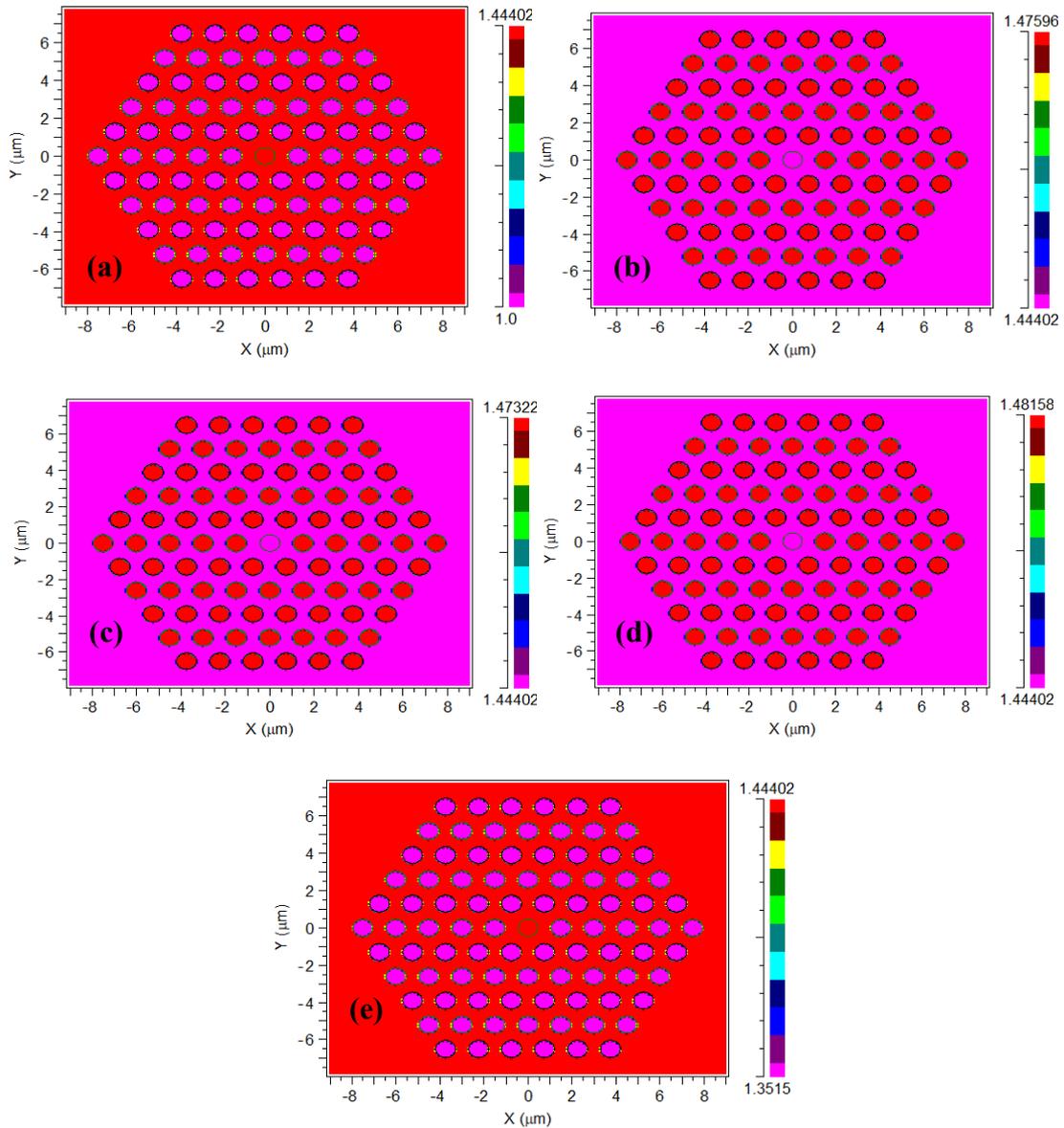
### III.7.1. Description de la structure de la PCF

La figure III.32 illustre la fibre microstructurée proposée. La silice est utilisée pour former la structure de base. Le revêtement du PCF suggéré comprend des trous d'air circulaires regroupés en cinq anneaux hexagonaux.

Les trous d'air, à travers lesquels l'analyte spécifique à tester est proposé d'être injecté pour la détection chimique, avaient un diamètre de  $d = 0,9 \mu\text{m}$ . La constante de pas spécifiée des trous d'air uniformément espacés est  $\Lambda = 1,5 \mu\text{m}$ . Le capteur PCF décrit est capable de détecter une large gamme d'analytes chimiques ; cependant, les analytes de test utilisés dans cette étude comprennent l'éthanol, le benzène, le toluène et le xylène. Les figures III.33 (a), (b), (c), (d) et (e) présentent le profil d'indice de la structure simulée : air, benzène, Toluène., Xylène et Ethanol successivement.



**Figure III. 32** La structure de la fibre microstructurée proposée.



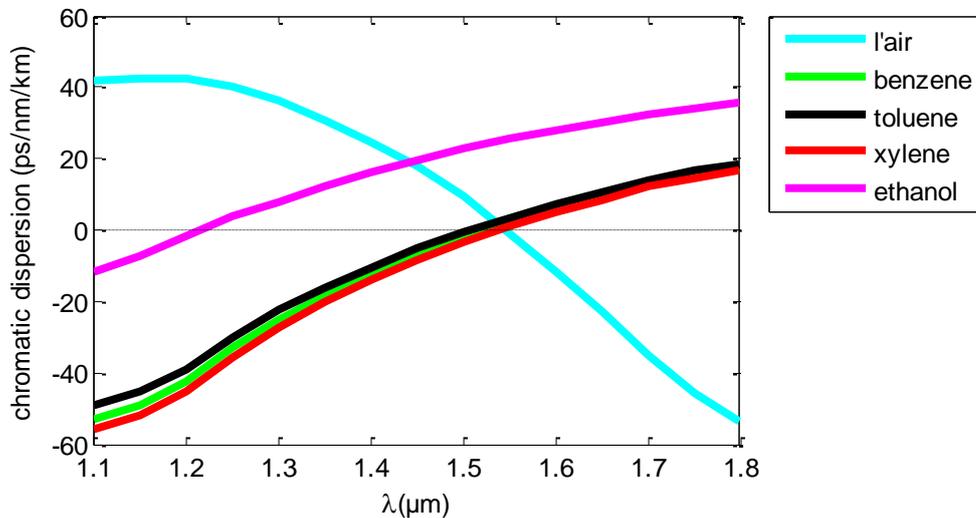
**Figure III. 33** Le profil d'indice de la fibre proposée (a) air. (b) benzène .(c) Toluène. (d) Xylène. (e) Ethanol.

### III.7.2. Résultats et interprétations

Les propriétés de dispersion du PCF ont été analysées à l'aide de la méthode BPM. En utilisant l'équation de Sellmeier ( équation III.2), nous pouvons étudier les caractéristiques de dispersion du PCF en tenant compte de l'indice de réfraction de la silice pure.

La Figure III.34 montre la relation entre la dispersion chromatique du PCF proposée et la longueur d'onde d'exploitation dans l'air, l'éthanol, le benzène, le toluène et le xylène. On peut observer que pour le benzène, le xylène et le toluène, la dispersion chromatique est négative et

particulièrement faible de  $1,1 \mu\text{m}$  à  $1,55 \mu\text{m}$ . Cela montre qu'à cette plage, l'interaction entre le signal lumineux et les analytes chimiques a été réussie, comparable à celle de l'éthanol et de l'air.



**Figure III. 34** La variation de la dispersion chromatiques en fonction de la longueur d'onde pour l'air, le benzène, le toluène, le xylène et l'éthanol.

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé diverses méthodes de modélisation appliquées aux fibres à cristaux photoniques. Nous avons présenté quelques principes théoriques de quelques méthodes parmi ces méthodes ; la méthode des éléments finis FEM, la méthode des différences finies FDTD et la méthode des faisceaux propagés BPM. Ensuite, nous avons exposé de différentes propositions de capteurs à base de cristaux photoniques.

Le but de notre étude consiste sur l'utilisation des capteurs à base des fibres microstructurées dans le domaine des télécommunications optiques. Nous avons utilisé la méthode numérique BPM. En premier temps, nous avons développé un capteur de pression en infiltrant les trous par l'eau. Les résultats indiquent que le capteur proposé pourrait constituer un choix prometteur pour la détection de pression en raison de sa grande précision et de sa sensibilité aux variations des différentes pressions et il a été observé que sa sensibilité augmente proportionnellement à l'augmentation de la longueur d'onde. Effectivement, nous avons démontré que ce capteur offre une détection directe, simple à concevoir, de petite taille et facile à fabriquer, ce qui en fait le candidat idéal pour la sensibilité à la pression.

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

---

Par la suite, nous avons proposé un capteur de salinité. Notre structure nous a permis d'analyser l'impact de la salinité sur les propriétés de la PCF. Les résultats de la sensibilité ont permis le développement d'un modèle de capteur de salinité basé sur des PCF de petite taille, offrant une construction et une production aisées ainsi qu'une détection améliorée à des longueurs d'onde spécifiques.

Ensuite, nous avons examiné comment la concentration du glucose affecte la dispersion de la PCF en infiltrant les trous d'air du premier anneau avec du glucose. Par conséquent, un capteur du glucose a été opérationnel avec succès. Cette technologie propose une détection directe, facile à concevoir, compacte et simple à produire, ce qui en fait un choix idéal pour la détection de la pression.

Enfin, nous avons proposé un capteur optique à base des fibres à cristaux photoniques pour une détection chimique. Les résultats étaient significatifs car ils mettent en évidence l'applicabilité du PCF proposé dans les communications optiques grâce à une dispersion chromatique adéquate, ainsi que dans les domaines industriels et de détection chimique.

Ces capteurs présentent une sensibilité élevée, une flexibilité de conception, une vaste gamme de capacités de mesure, ainsi qu'une adaptabilité à différents environnements. Ces caractéristiques en font des instruments précieux dans divers domaines de la recherche et de l'industrie.

#### Références :

- [1] J. Van Roey, J. Van der Donk, P. Lagasse, "Beam-propagation method: analysis and assessment", *J Josa*, 71, 803-810, 1981.
- [2] P. Monk, "Finite element methods for Maxwell's equations", Oxford University Press, 2003.
- [3] S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis", *J Optics express*, 8, 173-190, 2001.
- [4] T. Birkst, D. Mogilevtsev, J. Knight, P. S. J. Russell, J. Broeng, P. Roberts, J. West, D. Allan, J. Fajardo, "The analogy between photonic crystal fibres and step index fibres", *Optical Fiber Communication Conference*, Optica Publishing Group, 1999.
- [5] P. Clauberg, P. Von Allmen, "Vectorial beam-propagation method for integrated optics", *J Electronics Letters*, 8, 654-655, 1991.
- [6] H. P. Uranus, H. Hoekstra, "Modelling of microstructured waveguides using a finite-element-based vectorial mode solver with transparent boundary conditions", *J Optics express*, 12, 2795-2809, 2004.
- [7] J.-L. Batoz, G. Dhatt, "Modélisation des structures par éléments finis", Presses Université Laval, 1990.
- [8] L. Benachour, F. Hobar, "Etude et modélisation d'un guide à cristaux photoniques", Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2018.
- [9] C. T. Chan, Q. Yu, K. Ho, "Order-N spectral method for electromagnetic waves", *J Physical Review B*, 51, 16635, 1995.
- [10] M. Sigalas, N. Garcia, "Theoretical study of three dimensional elastic band gaps with the finite-difference time-domain method", *J Journal of Applied Physics*, 87, 3122-3125, 2000.
- [11] A. Taflove, "Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method 2nd edition (Boston, MA: Artech House)", 2000.
- [12] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *J IEEE Transactions on antennas propagation*, 14, 302-307, 1966.
- [13] M. Feit, J. Fleck, "An analysis of intersecting diffused channel waveguides", *J IEEE journal of quantum electronics*, 21, 1799-1805, 1985.
- [14] L. B. Felsen, "Hybrid formulation of wave propagation and scattering", Springer Science & Business Media, 2012.

- [15] O. Mitomi, K. Kasaya, "Wide-angle finite-element beam propagation method using Pade approximation", *J Electronics Letters*, 33, 1461-1462, 1997.
- [16] C. RSoft, "5.1. 9, "User guide" RSoft Design Group, 200 Executive Blvd", J Ossining, NY, 10562,
- [17] M. De, T. K. Gangopadhyay, V. K. J. S. Singh, "Prospects of photonic crystal fiber as physical sensor: An overview", 19, 464, 2019.
- [18] V. Fortin, Y. O. Aydin, M. Bernier, R. Vallée, M. Rochette, F. Chenard, O. Alvarez, L. E. Busse, L. B. Shaw, R. R. Gattass, "Post-processing soft glass optical fibers", Elsevier, 233-302, 2022.
- [19] F. Chenard, O. Alvarez, E. Schartner, H. Ebendorff-Heidepriem, "Mid-infrared chalcogenide polarization-maintaining single-mode fiber", *Optical Components and Materials XIX*, SPIE, 2022.
- [20] I. Thormählen, J. Straub, U. Grigull, "Refractive index of water and its dependence on wavelength, temperature, and density", *J Journal of physical chemical reference data*, 14, 933-945, 1985.
- [21] Z. Lou, L. Wang, G. Shen, "Recent advances in smart wearable sensing systems", *J Advanced Materials Technologies*, 3, 1800444, 2018.
- [22] E. K. Akowuah, I. Danladi, A. K. Amoah, "Design and Theoretical Analysis of Highly Negative Dispersion-Compensating Photonic Crystal Fibers with Multiple Zero-Dispersion Wavelengths", *J International Journal of Optics*, 2023, 2023.
- [23] R. Min, Z. Liu, L. Pereira, C. Yang, Q. Sui, C. Marques, "Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review", *J Optics Laser Technology*, 140, 107082, 2021.
- [24] I. S. Amiri, B. K. Paul, K. Ahmed, A. H. Aly, R. Zakaria, P. Yupapin, D. Vigneswaran, "Tri-core photonic crystal fiber based refractive index dual sensor for salinity and temperature detection", *J Microwave Optical Technology Letters*, 61, 847-852, 2019.
- [25] X. Wang, J. Wang, S.-S. Wang, Y.-P. Liao, "Fiber-optic salinity sensing with a panda-microfiber-based multimode interferometer", *J Journal of Lightwave Technology*, 35, 5086-5091, 2017.
- [26] W. Xu, X. Yang, C. Zhang, J. Shi, D. Xu, K. Zhong, K. Yang, X. Li, W. Fu, T. Liu, "All-fiber seawater salinity sensor based on fiber laser intracavity loss modulation with low detection limit", *J Optics express*, 27, 1529-1537, 2019.

- [27] X. Zhang, W. Peng, "Temperature-independent fiber salinity sensor based on Fabry-Perot interference", *J Optics express*, 23, 10353-10358, 2015.
- [28] D. Vigneswaran, N. Ayyanar, M. Sharma, M. Sumathi, M. Rajan, K. Porsezian, "Salinity sensor using photonic crystal fiber", *J Sensors Actuators A: Physical*, 269, 22-28, 2018.
- [29] D. Vigneswaran, N. Ayyanar, M. Sharma, M. Sumathi, M. Rajan, K. J. S. Porsezian, "Salinity sensor using photonic crystal fiber", 269, 22-28, 2018.
- [30] M. E. Rahaman, M. M. Hossain, H. S. Mondal, R. Saha, A. S. Muntaseer, "Theoretical analysis of large negative dispersion photonic crystal fiber with small confinement loss", *J Applied Optics*, 59, 8925-8931, 2020.
- [31] B. Riyadh, M. Hossain, H. Mondal, E. Rahaman, P. Mondal, M. Mahasin, "Photonic crystal fibers for sensing applications", *J J. Biosens. Bioelectron*, 9, 251, 2018.
- [32] R. Saha, M. M. Hossain, M. E. Rahaman, H. S. Mondal, "Design and analysis of high birefringence and nonlinearity with small confinement loss photonic crystal fiber", *J Frontiers of Optoelectronics*, 12, 165-173, 2019.
- [33] F. Iqbal, S. Biswas, A. A.-M. Bulbul, H. Rahaman, M. B. Hossain, M. E. Rahaman, A. Awal, "Alcohol sensing and classification using PCF-based sensor", *J Sensing Bio-Sensing Research*, 30, 100384, 2020.
- [34] A. A. Rifat, G. A. Mahdiraji, D. M. Chow, Y. G. Shee, R. Ahmed, F. R. M. Adikan, "Photonic crystal fiber-based surface plasmon resonance sensor with selective analyte channels and graphene-silver deposited core", *J Sensors*, 15, 11499-11510, 2015.
- [35] M. E. Rahaman, M. B. Hossain, H. S. Mondal, R. Saha, M. M. Hossain, M. S. Ahsan, "Highly sensitive photonic crystal fiber liquid sensor in terahertz frequency range", *J Materials Today: Proceedings*, 43, 3815-3820, 2021.
- [36] M. E. Rahaman, R. H. Jibon, M. B. Hossain, H. S. Mondal, A. A.-M. Bulbul, A. Saha, M. Hassan, "Sensing toxic carbonyl compounds in cigarette smoke by photonic crystal fiber", 2020 11th international conference on computing, communication and networking technologies (ICCCNT), IEEE, 2020.
- [37] Y. Zhao, Z.-q. Deng, J. Li, "Photonic crystal fiber based surface plasmon resonance chemical sensors", *J Sensors Actuators B: Chemical*, 202, 557-567, 2014.
- [38] B. Lee, S. Roh, J. Park, "Current status of micro-and nano-structured optical fiber sensors", *J Optical Fiber Technology*, 15, 209-221, 2009.

- [39] S. K. Chamoli, S. C. Singh, C. Guo, "Design of extremely sensitive refractive index sensors in infrared for blood glucose detection", *J IEEE Sensors Journal*, 20, 4628-4634, 2020.
- [40] S. Bendib, C. Bendib, "Photonic crystals for malaria detection", *J J. Biosens. Bioelectron*, 9, 1000257, 2018.
- [41] P. Y. Liu, L. K. Chin, W. Ser, H. Chen, C.-M. Hsieh, C.-H. Lee, K.-B. Sung, T. Ayi, P. Yap, B. Liedberg, "Cell refractive index for cell biology and disease diagnosis: past, present and future", *J Lab on a Chip*, 16, 634-644, 2016.
- [42] D. Bell, C. Wongsrichanalai, J. W. Barnwell, "Ensuring quality and access for malaria diagnosis: how can it be achieved?", *J Nature Reviews Microbiology*, 4, 682-695, 2006.
- [43] S. Suresh, "Mechanical response of human red blood cells in health and disease: Some structure-property-function relationships", *J Journal of materials research*, 21, 1871-1877, 2006.
- [44] Ankita, B. Suthar, A. Bhargava, "Biosensor application of one-dimensional photonic crystal for malaria diagnosis", *J Plasmonics*, 16, 59-63, 2021.
- [45] N. A. Mohammed, M. M. Hamed, A. A. Khalaf, S. El-Rabaie, "Malaria biosensors with ultra-sensitivity and quality factor based on cavity photonic crystal designs", *J The European Physical Journal Plus*, 135, 933, 2020.
- [46] M. Sakakura, Y. Lei, L. Wang, Y.-H. Yu, P. G. Kazansky, "Ultralow-loss geometric phase and polarization shaping by ultrafast laser writing in silica glass", *J Light: Science Applications*, 9, 15, 2020.
- [47] S. Liu, Z. Deng, J. Li, J. Wang, N. Huang, R. Cui, Q. Zhang, J. Mei, W. Zhou, C. Zhang, "Measurement of the refractive index of whole blood and its components for a continuous spectral region", *J Journal of biomedical optics*, 24, 035003-035003, 2019.
- [48] N. Ghosh, P. Buddhiwant, A. Uppal, S. Majumder, H. Patel, P. Gupta, "Simultaneous determination of size and refractive index of red blood cells by light scattering measurements", *J Applied Physics Letters*, 88, 2006.
- [49] A. Shafkat, A. N. Z. Rashed, H. M. El-Hageen, A. M. Alatwi, "Design and analysis of a single elliptical channel photonic crystal fiber sensor for potential malaria detection", *J Journal of Sol-gel science technology*, 98, 202-211, 2021.
- [50] V. S. Chaudhary, D. Kumar, S. Kumar, "Gold-immobilized photonic crystal fiber-based SPR biosensor for detection of malaria disease in human body", *J IEEE Sensors Journal*, 21, 17800-17807, 2021.

- [51] N. A. Mohammed, M. M. Hamed, A. A. KhalafS. El-Rabaie, "Malaria biosensors with ultra-sensitivity and quality factor based on cavity photonic crystal designs", J The European Physical Journal Plus, 135, 933, 2020.
- [52] J. R. Partington, "An advanced treatise on physical chemistry: Physico-chemical optics", Longmans, Green, 1953.
- [53] M. F. H. Arif, S. Asaduzzaman, K. AhmedM. Morshed, "High sensitive PCF based chemical sensor for ethanol detection", 2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV), IEEE, 2016.
- [54] J. E. Rubio, J. M. Arsuaga, M. Taravillo, V. n. G. BaonzaM. Cáceres, "Refractive index of benzene and methyl derivatives: temperature and wavelength dependencies", J Experimental thermal fluid science, 28, 887-891, 2004.
- [55] J. E. BertieZ. Lan, "The refractive index of colorless liquids in the visible and infrared: Contributions from the absorption of infrared and ultraviolet radiation and the electronic molar polarizability below  $20\ 500\ \text{cm}^{-1}$ ", J The Journal of chemical physics, 103, 10152-10161, 1995.

# Conclusion générale et perspectives

Ce travail de recherche a exploré les fibres à cristaux photoniques (PCF) en tant que plateforme prometteuse pour la réalisation de capteurs à haute sensibilité, répondant aux besoins croissants de technologies de détection performantes dans divers domaines. L'étude s'est concentrée sur la modélisation numérique des PCF, permettant d'identifier les paramètres géométriques clés qui influencent les propriétés optiques de ces structures et, par conséquent, la sensibilité des capteurs.

Les résultats de la thèse ont mis en évidence le potentiel remarquable des PCF pour la conception de capteurs innovants pour la détection de la pression, de la salinité, du glucose, de la malaria et de substances chimiques. Les simulations numériques ont permis de démontrer l'efficacité de la méthode des faisceaux propagés (BPM) pour l'analyse des PCF, offrant un outil précieux pour l'optimisation de la conception des capteurs. L'étude a également mis en évidence l'importance de la sélection judicieuse des paramètres géométriques des PCF, tels que le diamètre et l'espacement des trous d'air, ainsi que la nature du milieu infiltré, pour maximiser la sensibilité.

## Contributions significatives :

**Développement de capteurs à haute sensibilité :** La thèse a permis de développer des designs de PCF innovants pour la détection de différents paramètres, avec des résultats remarquables :

- **Capteur de pression :** Un capteur de pression basé sur une PCF hexagonale infiltrée d'eau a été conçu, présentant une sensibilité de  $-0,0236908$  (ps/nm/km)/bar à une longueur d'onde de  $1,7 \mu\text{m}$ . Ces résultats démontrent que la sensibilité du capteur augmente proportionnellement à l'augmentation de la longueur d'onde.
- **Capteur de salinité :** Un capteur de salinité à base de PCF a été développé, atteignant une sensibilité maximale de  $0,10815$  (ps/nm/km)/PSU à une longueur d'onde de  $1,3 \mu\text{m}$ . L'étude a démontré que la modification du diamètre des trous d'air du premier anneau de la PCF permet d'améliorer la sensibilité.
- **Capteur de glucose :** Un capteur de glucose à base de PCF a été conçu, atteignant une sensibilité de  $0,11493$  (ps/nm/km)/(g/l) à une longueur d'onde de  $1,55 \mu\text{m}$  lorsque les

trous sont infiltrés d'eau. Les simulations ont montré que l'infiltration d'eau dans les trous d'air améliore la sensibilité du capteur.

- **Capteur de malaria** : Un capteur de malaria a été proposé, capable de détecter le parasite responsable de la maladie en mesurant l'indice de réfraction de l'hémoglobine. Le capteur a montré une sensibilité de  $0,232 \text{ (ps/nm/km)/(g/L)}$  à une longueur d'onde de  $1,2 \text{ }\mu\text{m}$ , démontrant son potentiel pour un diagnostic rapide et précis.
- **Capteur chimique**: Un capteur chimique à base de PCF a été conçu pour la détection de différents solvants (benzène, toluène, xylène et éthanol). Les simulations ont montré que la dispersion chromatique du PCF est sensible à la nature du solvant, permettant de différencier les analytes.

**Validation de la méthode des faisceaux propagés (BPM)**: La thèse a validé l'efficacité de la BPM pour la modélisation des PCF, permettant une analyse approfondie des propriétés de propagation de la lumière dans ces structures complexes.

**Identification des paramètres clés influant sur la sensibilité** : L'étude a identifié les paramètres géométriques cruciaux qui influencent la sensibilité des capteurs à base de PCF, permettant une optimisation fine de la conception des capteurs.

### **Perspectives futures :**

Le développement de capteurs à base de PCF est un domaine de recherche en pleine expansion, offrant de nombreuses perspectives prometteuses pour des travaux futurs. Il serait intéressant d'explorer :

L'intégration de PCF avec des nanomatériaux, le développement de capteurs multiparamétriques, l'optimisation des méthodes de fabrication des PCF.

En conclusion, les PCF se positionnent comme une technologie prometteuse pour la conception de capteurs à haute sensibilité et à performance optimale. Cette thèse a permis d'apporter des contributions importantes à ce domaine, ouvrant de nouvelles perspectives pour le développement de solutions innovantes pour la surveillance et le contrôle des systèmes complexes.

# Liste des travaux

## Travaux de communications nationales :

- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL, Hicham CHIKH-BLED. **Les capteurs à fibre optique** ». Journée d'étude sur les télécommunications, JT'21, Ain Témouchent, Algeria.
- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL, Hicham CHIKH-BLED and Ahlam Assia HARRAT. « **The impact of geometric imperfections on chromatic dispersion in microstructured fibers** ». Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications CNTA'21, Ain Témouchent, Algeria.
- Ahlem Assia HARRAT, Mohammed DEBBAL, Mohammed Chamse Eddine OUADAH and Ilhem MIRED. « **Dispersion comparison of photonic crystal fiber** ». Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications CNTA'21, Ain Témouchent, Algeria.
- Mohammed Chamse Eddine Ouadah, Mohammed Debbal, Chikh-Bled Mohammed El-Kebir, Hicham Chikh-Blerd, Mouweffaq Bouregaa, Samir Benhamou, Ahlem Harrat and Ilhem Mired, « **Designing of square photonic crystal fiber with high birefringence** ». Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications CNTA'21, Ain-Témouchent, Algeria.
- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL and Hicham CHIKH-BLED. « **Conception des capteurs optiques à base des fibres microstructurée** ». Journée d'étude sur les Télécommunications JT'22, Ain-Témouchent, Algeria.
- Ilhem Mired, Mohammed Debbal, Hicham Chikh-Bled, « 2ème Semaine Scientifique Nationale 2SSN Sétif, ALGERIA », “ **Détection des élévations de chaleur dans les zones sensibles à l'aide des fibres optiques (Station nucléaire, volcan, ...)** ”.
- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL and Hicham CHIKH-BLED, Ahlem Assia Harrat. “**Study on some properties of a PCF pressure sensor**”. Conférence Nationale sur les Télécommunications et ses Applications CNTA'22, Ain-Témouchent, Algeria.
- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL and Hicham CHIKH-BLED “**Design and simulation of a novel hexagonal Photonic Crystal Fiber for liquid sensing**”. 3<sup>rd</sup> National Conference On Applied Physics & Chemistry, NCAPC 2023, Laghouat, Algeria.

## Liste des Travaux

---

- Mohammed DEBBAL, Ilhem Mired, Mouweffeq BOUREGAA, Mohammed Chamse Eddine OUADAH, Hicham CHIKH-BLED. “**Advancements in Optical Fiber and Photonic Crystal-Based Biosensors: Potential and Applications**”. Materials Sciences and Engineering, MSE’23, Maghnia, Tlemcen, Algeria.

### Travaux de communications internationales :

- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL, Hicham CHIKH-BLED and Ahlam Assia HARRAT, “**Study of the sensitivity of sensors based on photonic crystal fiber**”. 22<sup>st</sup> International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2021, Kyiv, Ukraine.
- Ahlem Assia HARRAT, Mohammed DEBBAL, Mohammed Chamse Eddine OUADAH and Ilhem MIRED, “**The properties of photonic crystal fiber**”, 22<sup>st</sup> International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2021, Kyiv, Ukraine.
- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL and Hicham CHIKH-BLED. “**Salinity sensor based on a hexagonal photonic crystal fiber**”. 11<sup>th</sup> International Conference on Renewable Electrical Power Sources ICREPS 2023, Belgrade, Serbia.

### Travaux de publications :

- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL and Hicham CHIKH-BLED. (2023). “**Pressure sensing based on photonic crystal fiber by infiltrating the air-holes with water**”. Progress in Electromagnetics Research C, vol. 130. Classe B, SJR 1.898 doi:10.2528/PIERC22122503
- Ilhem MIRED, Mohammed DEBBAL and Hicham CHIKH-BLED, (2024). “**A Photonic Crystal Fiber-Based Sensor for Glucose Concentration Detection**”. Molecular Physics, e2287691, Classe A, Impact Facteur 1.937. <https://doi.org/10.1080/00268976.2023.2287691>
- Ilhem MIRED, Hicham CHIKH-BLED and Mohammed DEBBAL. Microwave Review. “**Photonics Crystal Fiber for Salinity Sensing Applications with A Large Negative Dispersion**”. (Accepté)

## Résumé

Ce travail de recherche explore le potentiel des fibres à cristaux photoniques (PCF) pour la conception de capteurs à haute sensibilité, répondant ainsi à la demande croissante de solutions de détection performantes dans divers domaines. Grâce aux caractéristiques exceptionnelles de ses fibres telles qu'une grande flexibilité de guidage de la lumière et une forte interaction entre le cœur de la fibre et l'environnement externe. La thèse se concentre sur la modélisation numérique des PCF, permettant d'identifier les paramètres géométriques clés qui influencent leurs propriétés optiques et, par conséquent, la sensibilité des capteurs.

La technique numérique utilisée pour simuler la propagation de la lumière dans est la méthode Beam Propagation Method (BPM). Cette méthode est utile pour modéliser l'évolution des champs électromagnétiques dans des dispositifs à guidage optique non homogène. Ce qui est essentiel pour concevoir des capteurs optiques sensibles et efficaces.

Les contributions de cette thèse ouvrent de nouvelles perspectives prometteuses pour le développement de capteurs à base de PCF, offrant des solutions innovantes pour des applications variées, notamment en santé, en environnement et en industrie.

L'étude propose des directions futures pour la recherche, incluant l'intégration de nanomatériaux aux structures PCF, le développement de capteurs multiparamétriques et l'optimisation des techniques de fabrication. Les résultats de la thèse mettent en lumière le potentiel des PCF pour la réalisation de capteurs à haute sensibilité et à performance optimale, contribuant ainsi à l'avancement des technologies de détection et de surveillance.

**Mot clés :** Fibres optiques, Fibres à cristaux photoniques, Sensibilité, Dispersion chromatiques, Modélisation numérique.

---

## Abstract

This research explores the potential of photonic crystal fibers (PCF) for the design of high-sensitivity sensors, addressing the growing demand for effective detection solutions across various fields, such as high flexibility in guiding light and strong interaction between the fiber core and the external environment. The thesis focuses on the numerical modeling of PCFs, allowing for the identification of key geometric parameters that influence their optical properties and, consequently, the sensitivity of the sensors.

The numerical technique used to simulate light propagation is the Beam Propagation Method (BPM). This method is useful for modeling the evolution of electromagnetic fields in non-homogeneous optical guiding devices, which is essential for designing sensitive and efficient optical sensors.

The contributions of this thesis open up new promising perspectives for the development of PCF-based sensors, offering innovative solutions for various applications, particularly in health, environmental, and industrial fields.

The study proposes future research directions, including the integration of nanomaterials into PCF structures, the development of multiparameter sensors, and the optimization of fabrication techniques. The results of the thesis highlight the potential of PCFs for creating high-sensitivity, optimally performing sensors, thus contributing to the advancement of detection and monitoring technologies.

**Keywords:** Optical fibers, Photonic crystal fibers, Sensitivity, Chromatic dispersion, Numerical modeling.